

TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISIS KEGAGALAN *RING SEGMENT COBALT BASE*
SUPERALLOYS X40 PADA TURBIN GAS PEMBANGKIT
LISTRIK PT. X**

RIYAN RENARDI
NRP 02511440000100

Dosen Pembimbing
Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc.
Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISIS KEGAGALAN *RING SEGMENT*
COBALT BASE SUPERALLOYS X40 PADA
TURBIN GAS PEMBANGKIT LISTRIK PT. X**

RIYAN RENARDI
NRP 02511440000100

Dosen Pembimbing
Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc.
Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

FAILURE ANALYSIS OF RING SEGMENT COBALT BASE SUPERALLOYS X40 ON GAS TURBINE ELECTRICAL POWER PLANT PT.X

RIYAN RENARDI
NRP 02511440000100

Advisor
Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc.
Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.

DEPARTEMENT OF MATERIAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

(halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISIS KEGAGALAN RING SEGMENT COBALT BASE
SUPERALLOYS X40 PADA TURBIN GAS PEMBANGKIT
LISTRIK PT. X**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RIYAN RENARDI
NRP. 02511440000100

Disetujui Oleh Tim Pembimbing Tugas Akhir:

1. Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc. (Pembimbing 1)
2. Lukman Noerochidin, ST., M.Sc. Eng., Ph.D. (Pembimbing 2)



(halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS KEGAGALAN *RING SEGMENT COBALT BASE SUPERALLOYS X40* PADA TURBIN GAS

Nama Mahasiswa : Riyan Renardi
NRP : 02511440000100
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing : Tubagus Noor Rohmannudin, ST.,
M.Sc.
Co-Pembimbing : Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng.,
Ph.D.

Abstrak

Listrik merupakan sumber daya yang sangat dibutuhkan oleh manusia untuk memenuhi kebutuhan hidup, listrik sendiri didapatkan dari perusahaan pembangkit listrik. Salah satu pengolahan energi listrik yang dilakukan adalah dengan menggunakan turbin. Dalam penelitian ini ada bagian turbin yang mengalami kegagalan, yaitu material *ring segment*, rumusan masalah yang dikaji dalam penelitian ini adalah apa saja faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan *ring segment*, bagaimana mekanisme kegagalan yang terjadi pada *ring segment*, apa saja hal-hal yang perlu dilakukan agar kegagalan *ring segment* dapat ditanggulangi. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah uji komposisi, makrografi, struktur mikro, SEM, EDX, *hardness*, dan XRD. Hasil yang didapatkan dari pengujian tersebut adalah terdapat retakan yang menyebabkan patahan, dengan hasil struktur mikro mempunyai struktur karbida. Untuk hasil uji komposisi banyak terkandung unsur *cobalt*, *chrome*, *nickle*. Dengan hasil uji kekerasan 310 dan 324 HVN.

Katakunci: Turbin Gas, *Ring Segment*, Analisa Kegagalan

(halaman ini sengaja dikosongkan)

FAILURE ANALYSIS OF RING SEGMENT COBALT BASE SUPERALLOYS X40 ON GAS TURBINE

Name : Riyan Renardi
NRP : 02511440000100
Departement : Teknik Material
Advisor : Tubagus Noor Rohmannudin, ST.,
M.Sc.
Co-Advisor : Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng.,
Ph.D.

Abstract

Electricity is a resource that is needed by humans to meet the needs of life, electricity itself is obtained from power generation companies. One of the electrical energy processing that is done is by using turbine. In this research, there are parts of turbine that have failed, that is ring segment, the problem formulation studied in this research is what are the factors causing the occurrence of ring segment failure, how the mechanism of failure that occurs in the ring segment, what are the things needs to be done so that ring segment failure can be overcome. Tests conducted in this study are composition test, macrography, microstructure, SEM, EDX, hardness, and XRD. The result obtained from the test is that there is a crack causing the fracture, with the result of the microstructure having the carbide structure. For the compositional test results contained many elements of cobalt, chrome, nickle. With hardness test results 310 and 324 HVN.

Keyword: Gas Turbine, Ring Segment, Failure Analysis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **ANALISI KEGAGALAN *RING SEGMENT COBALT BASE SUPERALLOY X40* PADA TURBIN GAS PEMBANGKIT LISTRIK PT. X** yang menjadi salah satu syarat kelulusan Sarjana Teknik (S.T.) Departemen Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis juga ingin mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bimbingan kepada penulis hingga tugas akhir ini diselesaikan. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Kedua orangtua dan seluruh keluarga penulis yang telah memberikan dukungan baik berupa moral, moril dan doa.
2. Bapak Tubagus Noor Rohmannudin, ST., M.Sc. dan Bapak Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng., Ph.D. sebagai dosen pembimbing Tugas Akhir.
3. Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
4. Bapak Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen wali yang membimbing penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Material.
5. Seluruh dosen Teknik Material yang telah memberikan ilmu yang dapat menjadi bekal untuk masa yang akan datang.
6. Seluruh teman teman MT 16 yang telah membantu dan mendukung penulis.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi semua.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PENGESAHAN | v |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACT | ix |
| KATA PENGANTAR..... | xi |
| DAFTAR ISI..... | xii |
| DAFTAR GAMBAR | xv |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 3 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1 Turbin Gas..... | 5 |
| 2.1.1 Komponen pada Turbin Gas | 6 |
| 2.1.2 Bahan Bakar | 6 |
| 2.2 Kobalt..... | 7 |
| 2.3 Analisa kegagalan | 9 |
| 2.3.1 Prosedur dalam Analisa Kegagalan..... | 11 |
| 2.4 Patah Ulet dan Patah Getas..... | 11 |
| 2.4.1 Patah Ulet | 12 |
| 2.4.2 Patah Getas | 15 |
| 2.5 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah | 17 |
| 2.5.1 Tahap Retak Awal (<i>Crack Initiation</i>)..... | 18 |
| 2.5.2 Tahap Perambatan Retak (<i>Crack Propagation</i>) | 20 |
| 2.6 Karakteristik Patahan | 21 |
| 2.7 Kelelahan (<i>Fatigue</i>)..... | 22 |
| 2.7.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah .. | 23 |
| 2.7.2 Perambatan Retak <i>Fatigue</i> | 25 |
| 2.8 Macam-Macam Pengujian | 25 |
| 2.9 Korosi..... | 28 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.10 Penelitian Sebelumnya | 29 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian..... | 31 |
| 3.2 Metode Penelitian..... | 32 |
| 3.3 Material yang Digunakan | 32 |
| 3.4 Peralatan | 34 |
| 3.5 Tahapan Penelitian | 35 |
| 3.5.1 <i>Review</i> Dokumen Perusahaan | 35 |
| 3.5.2 Pengujian Komposisi Unsur Kimia..... | 35 |
| 3.5.3 Pengamatan Makro | 35 |
| 3.5.4 Preparasi Spesimen | 35 |
| 3.5.5 Pengujian Struktur Mikro..... | 35 |
| 3.5.6 Pengujian Kekerasan..... | 36 |
| 3.5.7 Pengujian SEM | 37 |
| 3.5.8 Pengujian XRF..... | 38 |
| 3.5.9 Pengujian XRD | 38 |
| 3.6 Rancangan Penelitian | 39 |
| BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1 Analisis Data | 41 |
| 4.1.1 Data Operasional..... | 41 |
| 4.1.2 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Material <i>Ring Segment</i> | 42 |
| 4.1.3 Hasil Pengamatan Makroskopik Material <i>Ring Segment</i> | 43 |
| 4.1.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Material <i>Ring Segment</i> | 45 |
| 4.1.5 Hasil Pengamatan SEM Material <i>Ring Segment</i> | 46 |
| 4.1.6 Hasil Pengujian EDX Material <i>Ring Segment</i> | 47 |
| 4.1.7 Hasil Pengujian Kekerasan Material <i>Ring Segment</i> | 52 |
| 4.1.8 Hasil Pengujian XRD Material <i>Ring Segment</i> | 52 |
| 4.2 Pembahasan..... | 53 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | |
| 5.1 KESIMPULAN | 57 |
| 5.2 SARAN | 57 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 59 |
| LAMPIRAN..... | 61 |

BIODATA PENULIS 79

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1 Jenis-Jenis Pembangkit dan Laju Panas yang Dihasilkan | 5 |
| Gambar 2.2 Efek dari berbagai jenis bahan bakar pada temperatur pemasukan | 7 |
| Gambar 2.3 Bentuk Patahan (a) ulet, (b) ulet setelah terjadi <i>necking</i> , (c) getas tanpa terjadi deformasi plastis .. | 13 |
| Gambar 2.4 Tahap patahan cup dan cone (a) awal <i>necking</i> , (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan <i>cavity</i> hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan..... | 13 |
| Gambar 2.5 Penampakan (a) patah ulet (<i>cup and cone</i>) pada aluminium, dan (b) patah getas pada <i>mild steel</i> | 14 |
| Gambar 2.6 Hasil SEM (a) <i>spherical dimple</i> karakteristik, patahan hasil beban tarik <i>unixial</i> , 3300x, dan (b) <i>spherical dimple</i> karakteristik hasil beban geser, 5000x | 15 |
| Gambar 2.7 Penampakan foto (a) bentuk V “chevron” sebagai karateristik patah getas dan (b) permukaan patah getas daerah asal retakan..... | 15 |
| Gambar 2.8 (a) skema perambatan retak yang melewati butir (<i>transganular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular | 16 |
| Gambar 2.9 (a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (<i>intergranular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara <i>intergranular</i> | 17 |
| Gambar 2.10 Mekanisme patah lelah dan faktornya..... | 18 |
| Gambar 2.11 Model Wood untuk pengintian retak..... | 19 |
| Gambar 2.12 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban Tarik maksimum (d) beban tekan maksimum (e) beban nol (f) beban tarik kecil..... | 20 |
| Gambar 2.13 Skema Pola Patahan..... | 23 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.14 Penekan oleh <i>Hardened Steel Ball</i> (ASTM E92-82) | 26 |
| Gambar 2.15 Skematis Prinsip Indentasi dengan Metode Vickers | 27 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian | 31 |
| Gambar 3.2 <i>Ring Segment</i> pada Turbin Gas | 33 |
| Gambar 3.3 <i>Ring Segment</i> yang patah | 33 |
| Gambar 3.4 Penampang Patahan <i>Ring Segment</i> | 34 |
| Gambar 3.5 Mikroskop Optik <i>Olympus BX51M-RF</i> | 36 |
| Gambar 3.6 Alat Uji kekerasan <i>Universal Hardness Tester HBRV 187.5A</i> | 37 |
| Gambar 3.7 Alat Uji SEM | 37 |
| Gambar 3.8 Alat Uji XRF | 38 |
| Gambar 3.9 Alat Uji XRD | 38 |
| Gambar 4.1 Cacat pada Material <i>Ring Segment</i> yang Tidak Mengalami Kegagalan (a) Material dengan Kode 1 (b) Material dengan Kode 2 (c) Material dengan Kode 3 (d) Material dengan Kode 5 (e) Material dengan Kode 28 (f) Material dengan Kode 29 (g) Material dengan Kode 32 | 44 |
| Gambar 4.2 Permukaan Patahan <i>Ring Segment</i> (a) Bagian Atas dengan Kode 30 (b) Bagian Bawah dengan Kode 30 (c) Bagian yang Hancur dengan Kode 31 | 44 |
| Gambar 4.3 Pola Patahan <i>Ring Segment</i> (a) Awal Pola Patahan dengan Kode 30 (b) Akhir Pola Patahan dengan Kode 30 (c) Pola Patahan dengan Kode 31 | 45 |
| Gambar 4.4 Hasil Metalografi pada Permukaan <i>Ring Segment</i> (a) Material dengan Kode 1 (b) Material dengan Kode 2 (c) Material dengan Kode 3 (d) Material dengan Kode 5 (e) Material dengan Kode 28 (f) Material dengan Kode 29 (g) Material dengan Kode 30 (h) Material dengan Kode 31 (i) Material dengan Kode 32 | 46 |
| Gambar 4.5 Hasil Metalografi pada Material <i>Cobalt Base Superalloys DZ40M</i> Sebagai Cetakan | 46 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.6 Morfologi pada Permukaan <i>Ring Segment</i> (a) Material dengan Kode 1 (b) Material dengan Kode 2 (c) Material dengan Kode 3 (d) Material dengan Kode 5 (e) Material dengan Kode 28 (f) Material dengan Kode 29 (g) Material dengan Kode 30 (h) Material dengan Kode 31 (i) Material dengan Kode 32 | 47 |
| Gambar 4.7 Hasil Pengujian XRD | 52 |

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 Permasalahan dalam Kegagalan Komponen Mesin | 9 |
| Tabel 2.2 Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan Komponen Mesin..... | 10 |
| Tabel 2.3 Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin..... | 11 |
| Tabel 3.1 Rancangan Penelitian | 39 |
| Tabel 4.1 Data Operasional Turbin Gas | 41 |
| Tabel 4.2 Komposisi Bahan Bakar Minyak yang Digunakan | 41 |
| Tabel 4.3 Komposisi Bahan Bakar Gas yang Digunakan | 42 |
| Tabel 4.4 Pencocokan Hasil Uji Komposisi <i>ring segment</i> dengan ASTM A567 | 42 |
| Tabel 4.5 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 1. | 48 |
| Tabel 4.6 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 2. | 48 |
| Tabel 4.7 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 3. | 48 |
| Tabel 4.8 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 5. | 49 |
| Tabel 4.9 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 28 | 49 |
| Tabel 4.10 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 29 | 50 |
| Tabel 4.11 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 30 | 50 |
| Tabel 4.12 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 31 | 51 |
| Tabel 4.13 Hasil Pengujian EDX <i>Ring Segment</i> dengan Kode 32 | 51 |
| Tabel 4.14 Hasil Uji Kekerasan <i>Ring Segment</i> | 52 |

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 latar Belakang

Listrik merupakan sumber daya yang sangat dibutuhkan oleh manusia jaman sekarang untuk memenuhi kebutuhan hidup, listrik sendiri didapatkan dari perusahaan pembangkit listrik yang selanjutnya dialirkan ke rumah warga dengan tegangan yang lebih rendah. Sebelum masuk ke rumah warga dengan tegangan yang lebih rendah, pasokan listrik terlebih dahulu diproses oleh perusahaan pembangkit listrik. Salah satu proses yang digunakan adalah dengan menggunakan turbin, salah satu turbin yang digunakan adalah turbin bertenaga gas. Pada dasarnya cara kerja yang digunakan hampir sama dengan turbin bertenaga gas atau gabungan dari gas dan uap, yang membedakannya adalah bahan bakar yang digunakan, dan tentunya hasil yang diperoleh juga berbeda.

Pembangkit Listrik Tenaga Gas atau biasa disebut PLTG merupakan salah satu pembangkit yang dimiliki oleh perusahaan pembangkit listrik. PLTG sendiri dapat menghasilkan listrik dengan daya sebesar 526MW. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) merupakan pembangkit energi listrik yang menggunakan turbin gas sebagai penggerak generatornya, turbin gas dirancang dengan cara kerja yang sederhana dimana energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran diubah menjadi energi mekanis dan selanjutnya diubah menjadi energi listrik. Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (*fuel oil pump*) apabila yang digunakan adalah bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila menggunakan bahan bakar gas alam, pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut. Udara untuk pembakaran diperoleh dari kompresor utama, sedangkan panas untuk awal pembakaran dihasilkan oleh *ignitor* (busi). Proses pembakaran dilaksanakan didalam *Combustion Chamber* (ruang bakar). Udara dengan tekanan atmosfer ditarik masuk kedalam kompresor dan diberi tekanan



sebesar 250 Psi dicampur dengan bahan bakar dan dibakar dalam ruang bakar dengan temperature 1.093-1.648°C. Gas hasil pembakaran yang merupakan energi panas dan tekanan yang tinggi memiliki temperature kira-kira sebesar 900°C. Selanjutnya gas dialirkan ke turbin untuk memutar turbin, generator dikopel secara langsung dengan turbin, dengan demikian bila turbin berputar maka generator berputar, kompressor juga satu poros dengan turbin. Jadi tekanan gas yang dihasilkan dari ruang bakar selain memutar turbin juga untuk memutar compressor. Energi mekanis yang dihasilkan oleh turbin gas digunakan untuk memutar generator listrik, sehingga diperoleh energi listrik.

Turbin pada proses pembangkit listrik ini sangat penting, karena merupakan alat yang mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Salah satu bagian turbin untuk menjaga agar udara panas tersebut tetap konstan memutar turbin adalah *ring segment*, *ring segment* sendiri letaknya sangat dekat dengan *blade* turbin sehingga ada kemungkinan untuk bergesekan dengan *blade* turbin, dalam kasus ini turbin gas pembangkit listrik mengalami getar yang kuat pada 2 September 2017, setelah dilakukan inspeksi terdapat bagian dari *ring segment* row 2 yang terlepas dari rel, yaitu pada *ring segment* no. 31 dan *ring segment* no. 30 yang terbelah menjadi dua bagian. Dari kejadian tersebut perlu dilakukan inspeksi untuk mengetahui kondisi dari material *ring segment*. Diharapkan dengan mengetahui kondisi material dari *ring segment* tersebut dapat diketahui penyebab terjadinya loss material pada turbin gas pembangkit listrik.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang dikaji dalam analisa kegagalan ini adalah sebagai berikut:

1. Apa saja faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan *ring segment* pada turbin gas?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan yang terjadi pada *ring segment* pada turbin gas?



3. Apa saja hal-hal yang perlu dilakukan agar kegagalan *ring segment* pada turbin gas dapat ditanggulangi?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan permasalahan yang telah disebutkan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa fakto-faktor penyebab terjadinya kegagalan *ring segment* pada turbin gas.
2. Menganalisa mekanisme terjadinya kegagalan *ring segment* pada turbin gas.
3. Menganalisa cara penanggulangan kegagalan *ring segment* pada turbin gas.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisa permasalahan, maka dilakukan pembatasan masalah, yaitu:

1. Temperatur, tekanan, dan volume udara yang mengalir dianggap sesuai dengan data operasi.
2. Desain *ring segment* dianggap memenuhi standar operasional.
3. Material dianggap homogen.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat kepada pihak yang berkaitan, yaitu mahasiswa sebagai pelaksana penelitian mampu memahami serta mengaplikasikan ilmu yang telah didapatkan khususnya cabang ilmu material dan metalurgi, manfaat yang didapatkan yaitu:

1. Menentukan fakor-faktor penyebab terjadinya kegagalan *ring segment* pada turbin gas.
2. Masukan untuk hal-hal yang dapat dilakukan agar kegagalan *ring segment* pada turbin gas dapat ditanggulangi.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

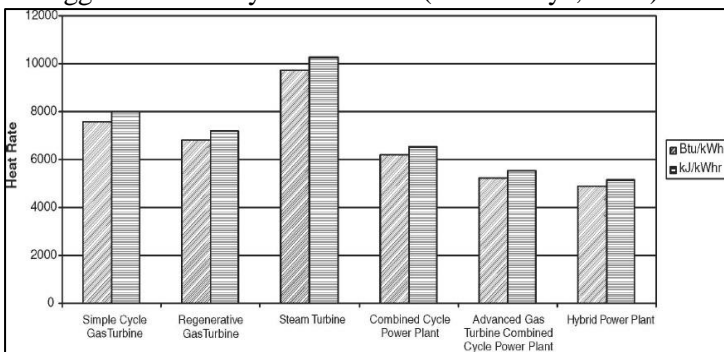
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Gas

Turbin gas merupakan alat yang banyak digunakan untuk mengkonversikan energi yang digunakan pada pembangkit-pembangkit listrik. Dalam upaya menghasilkan daya listrik maka turbin gas ini akan mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Energi mekanik untuk merotasi turbin dihasilkan dari energi kinetik fluida dari pembakaran pada temperatur dan tekanan tinggi.

Turbin gas terdiri dari tiga komponen utama: kompresor, ruang bakar dan turbin. Kompresor digunakan untuk meningkatkan tekanan dan temperatur dari udara yang akan dialirkan ke ruang bakar. Udara yang bertekanan tinggi ini digunakan pada pembakaran untuk menghasilkan fluida dengan energi tinggi sebagai penggerak poros yang berotasi pada putaran 3000 – 6000 putaran per menit dalam kumparan magnetik pada generator sehingga dihasilkannya arus listrik. (Candraditya, 2009)



Gambar 2.1 Jenis-Jenis Pembangkit dan Laju Panas yang Dihasilkan (Boyce, 2012)



2.1.1 Komponen pada Turbin Gas

a. Kompresor

Kompresor merupakan alat yang digunakan untuk meningkatkan tekanan udara yang akan digunakan pada ruang bakar dalam proses pembakaran. Udara dari atmosfer ditarik terus menerus dan dikompresi hingga memiliki rasio tertentu untuk mencapai tekanan tinggi.

Kompresor terbagi menjadi dua jenis yaitu kompresor sentrifugal dan kompresor aksial. Kompresor sentrifugal digunakan pada jenis unit turbin gas yang kecil. Sedangkan kompresor aksial digunakan pada turbin gas yang mempunyai daya lebih dari 5MW.

b. Ruang Pembakaran

Ruang pembakaran adalah daerah terjadinya proses pembakaran antara oksigen hasil kompresi dan bahan bakar.

c. Turbin

Turbin merupakan alat yang digunakan untuk ekspansi fluida. Turbin berfungsi sebagai penggerak dari generator pembangkit energi listrik.

2.1.2 Bahan Bakar

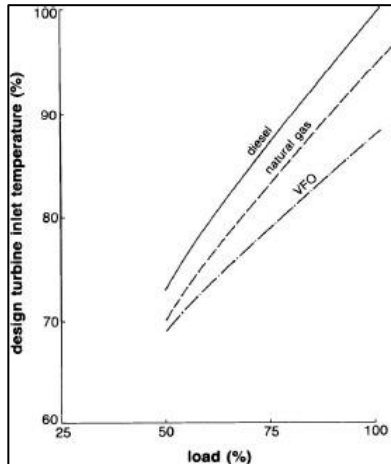
Dua jenis bahan bakar utama yang biasa digunakan pada turbin gas adalah jenis bahan bakar gas dan bahan bakar cair. Sekitar 40% dari turbin pembangkit dioperasikan dengan menggunakan bahan bakar cair. Bahan bakar cair dapat terbagi menjadi dua kelas utama yaitu bahan bakar yang didistilasi atau true distillate fuels dan ash-forming fuels. True distillate fuels merupakan bahan bakar yang telah dimurnikan dan bebas dari komponen pembentuk abu dan dapat langsung digunakan atau dilakukan sedikit pembersihan terlebih dahulu. Secara umum bahan bakar jenis ini mengandung kontaminasi dari natrium dan potasium hingga 1ppm serta sulfur hingga 1 persen berat. Sedangkan, ash-forming fuels membutuhkan pemansan, pembersihan maupun penambahan aditif dan dilakukan pembersihan berkala pada turbin. Selain tingginya jumlah natrium dan potasium hingga 100ppm, sulfur hingga 4 persen berat, dan



vanadium hingga 100ppm bahan bakar jenis ash-forming fuels perlu dilakukan pemisahan dari kontaminasi logam alkali.

Spesifikasi bahan bakar yang diperlukan dan penting untuk diperhatikan dengan disain dari system pembakaran adalah sebagai berikut:

1. Panas yang dihasilkan
2. Kebersihan (keberadaan residu pembakaran, tingkat kontaminasi)
3. Tingkat korosi
4. Deposisi dan kecenderungan membentuk endapan
5. Ketersediaan



Gambar 2.2 Efek dari berbagai jenis bahan bakar pada temperatur pemasukan (Boyce, 2012)

2.2 Kobalt

Kobalt (Co), unsur kimia, logam feromagnetik Grup 9 (VIII B) dari tabel periodik, digunakan terutama untuk paduan tahan panas dan magnetik.

Logam ini diisolasi tahun 1735 oleh seorang ahli kimia Swedia, Georg Brandt, meskipun senyawa kobalt telah digunakan selama berabad-abad untuk memberikan warna biru untuk glasir



dan keramik. Kobalt telah terdeteksi di patung Mesir dan kalung manik-manik Persia pada milenium ke-3 SM, dalam gelas yang ditemukan di reruntuhan Pompeii, dan di Cina pada awal Dinasti Tang (618-907 ce) dan kemudian di porselen biru dinasti Ming (1368-1644). Nama kobold pertama kali digunakan pada abad ke-16 untuk bijih yang diduga mengandung tembaga tapi akhirnya diketahui bahwa bijih tersebut adalah bantalan bijih kobalt arsenik beracun. Brandt akhirnya menyimpulkan pada tahun 1742 bahwa warna biru pada bijih tersebut adalah karena adanya kobalt.

Kobalt, meskipun tersebar luas, akan tetapi jumlahnya hanya 0,001 persen dari kerak bumi. Kobalt ditemukan dalam jumlah kecil di darat dan meteorit asli nikel-besi, di Matahari dan bintang atmosfer, dan dalam kombinasi dengan unsur-unsur lain di perairan alami, dalam nodul di bawah lautan, di tanah, pada tumbuhan dan hewan, dan mineral seperti sebagai kobaltite, linnaeite, skutterudite, smaltite, heterogenite, dan erythrite. Bijih yang mengandung sedikit kobalt ditambang untuk mendapatkan kobalt. Jejak kobalt yang hadir di banyak bijih besi, nikel, tembaga, perak, mangan, seng, dan arsenik, yang sering ditemukan sebagai produk sampingan. Pengolahan yang kompleks diperlukan untuk mengonsentrasikan ekstrak dari bijih tersebut. Kobalt yang dipoles akan terlihat perak-putih dengan semburat kebiruan samar. Kobalt dikenal memiliki dua alotrop: struktur-padat-heksagonal yang stabil di bawah 417°C (783°F) dan berpusat muka-kubik, stabil pada suhu tinggi. Kobalt bersifat feromagnetik hingga 1.121°C (2.050°F, titik Curie dikenal tertinggi dari setiap logam atau alloy) dan mungkin menemukan aplikasi di mana sifat magnetik diperlukan pada suhu yang tinggi.

Sebagian besar kobalt yang dihasilkan digunakan untuk paduan khusus. Sebuah persentase produksi dunia yang relatif besar masuk ke paduan magnetik seperti Alnicos untuk magnet permanen. Jumlah kobalt yang cukup besar dimanfaatkan untuk paduan yang mempertahankan sifat mereka pada suhu tinggi dan superalloy yang digunakan di dekat titik leleh (di mana baja akan menjadi terlalu lunak). Kobalt juga digunakan untuk paduan keras,



baja perkakas, paduan rendah ekspansi (untuk kaca-to-metal segel), dan konstan-modulus (elastis) paduan (untuk hairsprings presisi). Kobalt adalah matriks yang paling memuaskan untuk karbida.

2.3 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan dapat diartikan sebagai pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut. Jadi tujuan utama dari Analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut. Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen. Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industry, faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat di karenakan:

A. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.1 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material

Tabel 2.1 Permasalahan dalam Kegagalan Komponen Mesin
(Brooks, 2002)

| Permasalahan | % |
|------------------------------|----|
| Kesalahan pemilihan material | 38 |
| Cacat produksi | 15 |
| Kesalahan perlakuan panas | 15 |



| | |
|------------------------------------------|----|
| Kesalahan desain mekanik | 11 |
| Kondisi operasi yang berlebihan | 8 |
| Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol | 6 |
| Pemeriksaan yang kurang baik | 5 |
| Material yang tidak jelas | 2 |

B. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.2 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2.2 Kasus Kegagalan Material Akibat Perawatan
Komponen Mesin (Brooks, 2002)

| Permasalahan | % |
|-----------------------------|----|
| Perawatan yang kurang baik | 44 |
| Cacat saat fabrikasi | 17 |
| Defisiensi desain | 16 |
| Pemakaian yang tidak normal | 10 |
| Cacat material | 7 |
| Penyebab yang tidak jelas | 6 |

C. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
2. Kegagalan getas akibat beban kejut
3. Kegagalan pada temperatur tinggi (pemuluran)
4. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
5. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat overload

D. Kondisi kerja yang ekstrim

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Penyebab Kegagalan dalam Komponen Mesin (Brooks, 2002)

| Penyebab kegagalan | % |
|---------------------------------------------------------|----|
| Korosi | 29 |
| Kelelahan (fatigue) | 25 |
| Kegagalan getas (brittle fatigue) | 16 |
| Kelebihan beban | 11 |
| Korosi temperature tinggi | 7 |
| Korosi retak tegang, korosi Lelah, penggetasan hydrogen | 6 |
| Pemuluran (creep) | 3 |
| Abrasi, erosi | 3 |

2.3.1 Prosedur dalam Analisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, 1992):

1. Data produksi: melting, rolling, forming, casting, heat treatment, dan proses machining
2. Analisa kimia: pengujian X-Ray, komposisi kimia
3. Sifat mekanik: tensile, hardness, impact, dan fatigue test.
4. Struktur metalurgi: struktur makro dan mikro struktur
5. Patah permukaan

2.4 Patah Ulet dan Patah Getas

Patahan adalah spesimen dari sebuah benda menjadi 2 atau lebih potongan karena terjadinya tegangan statik dan pada temperature yang relatif rendah terhadap titik leleh dari suatu material. Tegangan yang terjadi pada material bisa merupakan tegangan tarik, tegangan kompresi, tegangan geser ataupun torsi.



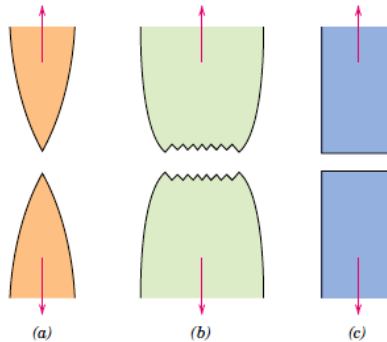
Dalam rekayasa material terdapat dua jenis mode patahan yang mungkin terjadi yaitu patahan ulet dan patah getas. Klasifikasi jenis patahan ini berdasarkan kemampuan sebuah material dalam menerima deformasi plastis yang dapat menyerap energi yang besar sebelum terjadi patahan. Material yang ulet mempunyai deformasi plastis yang tinggi, pembentukan small cavity diujung retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap. Sedangkan pada material yang getas mempunyai deformasi plastis rendah, tegangan local meningkat pada ujung retak sehingga retak menjalar dengan sangat cepat.

Patahan ulet dan getas pada suatu material tergantung pada kondisi pembebanan. Pada proses terjadinya patahan melibatkan dua tahap yaitu terbentuknya retak dan perambatan sebagai respon dari tegangan yang dialami oleh material. Modus patahan sangat bergantung pada perambatan retak.

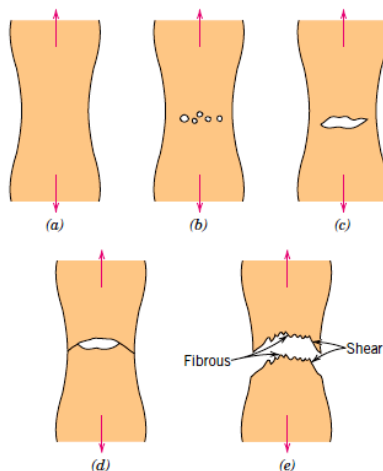
2.4.1 Patahan Ulet

Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada gambar 2.6 ditunjukkan skematik representative dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6 (a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.3 (b) dimana patahan didahului oleh adanya necking. Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan setempat (*necking*) *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di dalam struktur material seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.3 Bentuk Patahan (a) ulet, (b) ulet setelah terjadi *necking*, (c) getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister, 2007)



Gambar 2.4 Tahap patahan cup dan cone (a) awal *necking*, (b) terbentuknya *cavity* kecil, (c) pengumpulan *cavity* hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan (Callister, 2007)

Kemudian dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang



memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti gambar 2.7 (e) oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi.

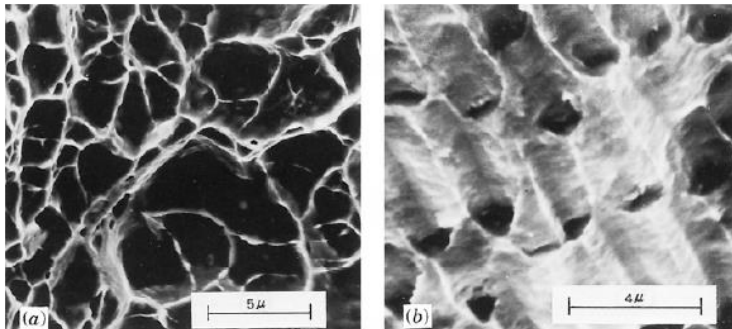
Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Lebih jauh lagi untuk mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi dari mikroskopik optik. Gambar 2.5 menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*.



Gambar 2.5 Penampakan (a) patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium, dan (b) patah getas pada *mild steel* (Callister, 2007)

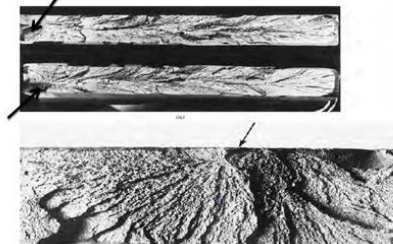
Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya

profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjaralan retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada Gambar 2.9.



Gambar 2.6 Hasil SEM (a) *spherical dimple* karakteristik, patahan hasil beban tarik *uniaxial*, 3300×, dan (b) *spherical dimple* karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister, 2007)

2.4.2 Patahan Getas

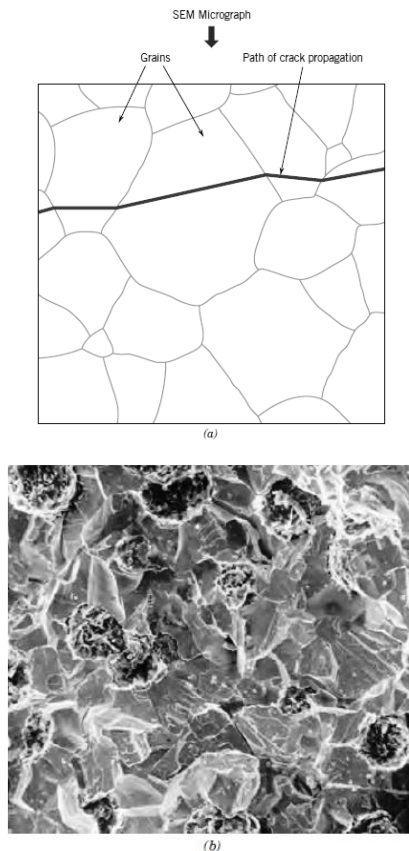


Gambar 2.7 Penampakan foto (a) bentuk V “chevron” sebagai karakteristik patah getas dan (b) permukaan patah getas daerah asal retakan (Callister, 2007)

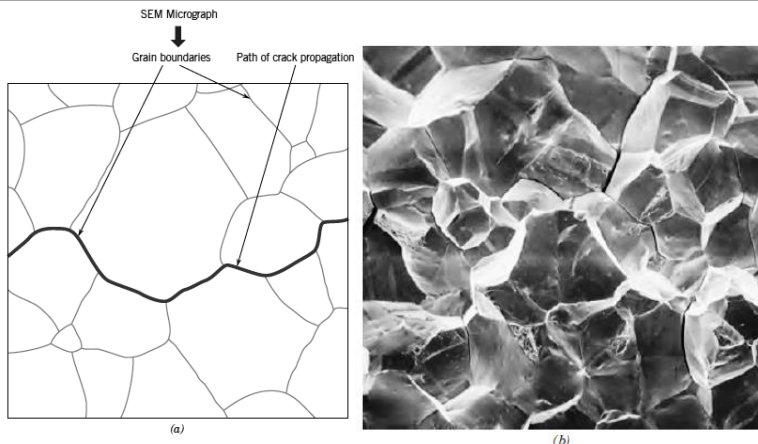
Patah getas sering terjadi tanpa adanya atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Retak/ patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (*transgranular*). Kemudian pada material lunak dengan



butir kasar (*coarse grain*) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan *chevron* seperti Gambar 2.7 (a) atau patah getas permukaan terlihat garis atau daerah asal retakan disebut *fan pattern* seperti pada Gambar 2.7 (b). Untuk hasil perambatan dan SEM, dapat terlihat jelas untuk retak yang melewati batas butir (*transgranular*) dan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) pada Gambar 2.8 dan 2.9.



Gambar 2.8 (a) skema perambatan retak yang melewati butir (*transgranular*) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular (Callister, 2007)

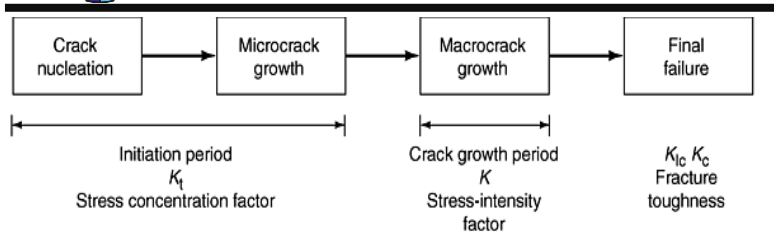


Gambar 2.9 (a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) (b) hasil SEM dari patah secara *intergranular* (Callister, 2007)

2.5 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjarangan retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah (tahap *final failure*).

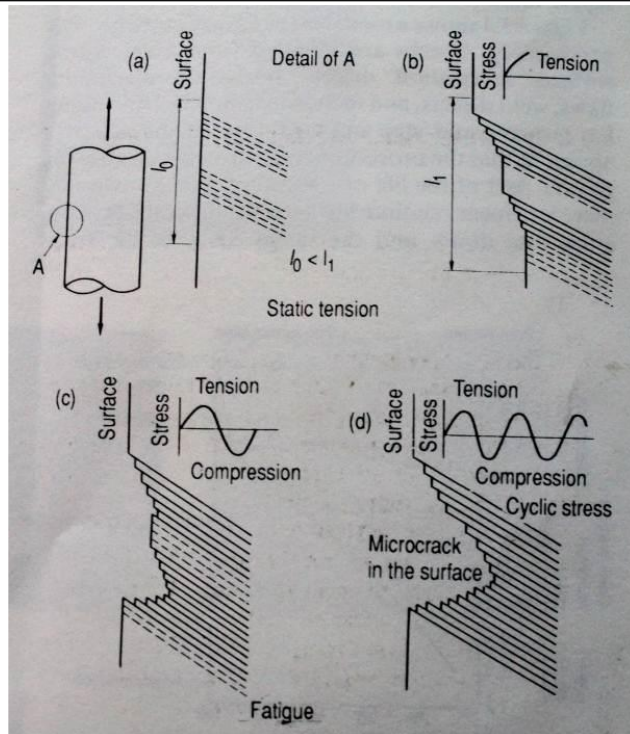
Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue* yaitu *Cyclic slip*, *Crack nucleation*, *Growth of microcrack*, *Growth of macrocrack*, *Final failure* (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002).



Gambar 2.10 Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 *Fatigue and Fracture*, 2002)

2.5.1 Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak secara sederhana diberikan oleh Wood. Beberapa model diberikan dalam menjelaskan *fatigue crack* pada gambar 2.14.



Gambar 2.11 Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, 1992)

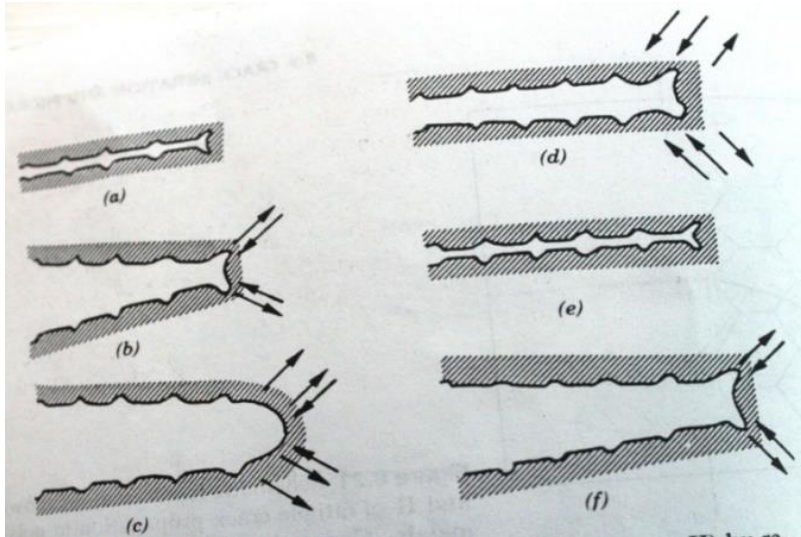
Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).



2.5.2 Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak. Awal retakan mula-mula menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Adapun model mekanisme crack secara plastis terdapat pada Gambar 2.12 dibawah ini.



Gambar 2.12 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban Tarik maksimum (d) beban tekan maksimum (e) beban nol (f) beban tarik kecil (Callister, 2007)



2.6 Karakteristik Patahan

Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modulus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patah lelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep/monotonic*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah dengan patah merangkak, jenis patah getas dengan patah ulet pada skala makro, dan jenis patah getas dengan patah ulet pada skala mikro (ASM Handbook Committee Volume 12, 2002).

A. Perbedaan karakteristik antara patah lelah dengan patah merangkak

Beachmarks dan striasi mengindikasikan patah lelah, sedangkan pada patah merangkak parameter tersebut tidak terlihat. Pertanda kehadiran beach marks bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, dan striasi hanya bisa diamati pada saat dilaksanakan *SEM fractography*. Profil *beachmarks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi beban yang diberikan pada benda.

B. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala makro

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pola patah getas ditunjukkan dengan permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis

sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, terdapat pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) baik patah getas yang bertransformasi jadi ulet ataupun patah ulet yang bertransformasi menjadi getas. Kebanyakan kasus yang terjadi adalah patah getas bertransformasi menjadi patah ulet.

C. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala mikro



Pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjaralan retakan mikro (*micro voids coalescence*). Sedangkan patah getas ditandai dengan fenomena patahan melintasi butiran atau patah transgranular, dikenal dengan nama *cleavage* atau fenomena patahan melewati butir atau intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*.

2.7 Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan atau *Fatigue* adalah kerusakan material yang diakibatkan oleh adanya tegangan yang berfluktuasi yang besarnya lebih kecil dari tegangan tarik maksimum (ultimate tensile strength) (σ_u) maupun tegangan luluh (*yield*). Apabila suatu logam dikenai tegangan berulang maka logam tersebut akan patah pada tegangan yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada beban statik. Adapun mekanisme terjadinya kegagalan *fatigue* dapat dibagi menjadi 3 fase yaitu antara lain:

1. Awal Retak (*crack initiation*)

Mekanisme *fatigue* umumnya dimulai dari adanya awal retakan yang terjadi di permukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadinya konsentrasi tegangan dipermukaan akibat adanya pembebanan yang berulang.

2. Perambatan Retak (*crack propagation*)

Jumlah total siklus yang menyebabkan kegagalan *fracture* merupakan penjumlahan jumlah siklus yang menyebabkan retakan awal dan fase perambatannya. Perambatan ini kemudian akan terus menjalar yang nantinya akan berujung pada *failure*.

3. Patah

Patahnya material terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen. Ketika terjadi penjaralan retak, penampang pada bagian tersebut akan berkurang sampai pada kondisi dimana penampang pada bagian tersebut tidak mampu menahan beban



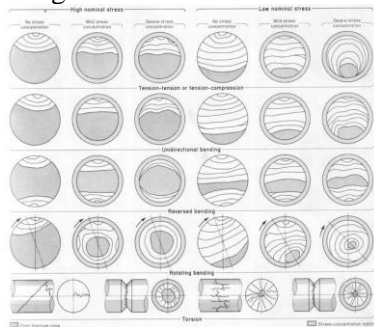
yang terakhir kali. Pada tahap ini penjaralan retak yang terjadi sangat cepat sehingga struktur akan terpecah menjadi dua. Karakteristik kelelahan logam dibagi menjadi dua yaitu:

a. Karakteristik makro

Karakteristik makro merupakan ciri-ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (dengan mata telanjang dan kaca pembesar).

b. Karakteristik mikro.

Karakteristik mikro merupakan ciri-ciri kelelahan yang hanya dapat diamati dengan menggunakan mikroskop. Pada dasarnya kegagalan *fatigue* dimulai dengan terjadinya retakan pada permukaan benda uji. Hal ini membuktikan bahwa sifat-sifat *fatigue* sangat peka terhadap kondisi permukaan, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kekasaran permukaan, perubahan sifat-sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan. Beberapa pola patahan *fatigue* ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Skema Pola Patahan (Van Gys, 2013)

2.7.1 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kekuatan Lelah

Faktor-faktor yang mempengaruhi atau cenderung mengubah kekuatan lelah yaitu jenis pembebanan, kelembaban lingkungan (korosi), temperatur, komposisi kimia bahan.

a. Faktor kelembaban lingkungan

Faktor kelembaban lingkungan sangat mempengaruhi kekuatan lelah sebagaimana yang telah diteliti Haftirman (1995) bahwa



pada kelembaban relatif 70 % sampai 80%. Lingkungan kelembaban yang tinggi akan terkorosi dan akan mengalami retak pada permukaan specimen yang menyebabkan kegagalan lebih cepat terjadi.

b. Tipe pembebanan

Tipe pembebanan sangat mempengaruhi kekuatan Lelah sebagaimana yang diteliti oleh Ogawa (1989) bahwa baja S45S yang diberikan tipe pembebanan lentur putar dan pembebanan aksial mempunyai kekuatan lelah yang sangat berbeda, baja S45S dengan pembebanan aksial mempunyai kekuatan lelah lebih rendah dari baja yang menerima pembebanan lentur putar. (Darami, 2009)

c. Faktor temperatur

Faktor temperatur sangat mempengaruhi kekuatan Lelah karena temperatur menaikkan konduktifitas elektrolit lingkungan sehingga dapat mempercepat proses oksidasi. Menurut Haftirman (1995) bahwa pada pengujian di temperatur 40°C retakan pada spesimen memanjang dari pada pengujian di temperatur 20°C dengan retakan yang halus, karena temperatur yang tinggi menyebabkan molekul air yang terbentuk mengecil di permukaan baja sehingga mempercepat terjadinya reaksi oksidasi dan membuat jumlah pit korosi jauh lebih banyak, akibatnya pit korosi cepat bergabung membentuk retakan yang memanjang. Dieter (1986) mengemukakan secara umum kekuatan lelah baja akan turun dengan bertambahnya temperatur di atas temperatur kamar kecuali baja lunak dan kekuatan lelah akan bertambah besar apabila temperature turun.

d. Faktor komposisi kimia

Faktor komposisi kimia sangat mempengaruhi kekuatan lelah karena apabila komposisi kimia tidak sesuai dengan standar yang sudah ada maka akan cepat mengalami kegagalan (*failure*). Sebagai contoh apabila suatu baja kekurangan kadar unsur karbon maka kekerasan dan kekuatannya akan turun sehingga akan cepat mengalami patah atau kegagalan.



2.7.2 Perambatan Retak *Fatigue*

Perambatan retak adalah tahap kedua dari ketiga tahap proses kegagalan atau kerusakan. Dalam tahap ini retak akan tumbuh dan menjalar hingga mencapai batas kritis (*critical size*). Dengan adanya perambatan retak maka suatu material akan memiliki umur (*fatigue life*) yang menandakan bahwa material tersebut sudah berada pada titik akhir dan tidak bisa menerima beban lagi. *Fatigue life* dapat ditingkatkan dengan cara:

1. Mengontrol tegangan
 - a. Peningkatan tegangan akan menurunkan umur *fatigue*.
 - b. Kegagalan *fatigue* selalu dimulai pada peningkatan tegangan.
 2. Mengontrol struktur mikro
 3. Mengontrol permukaan
 - a. Dalam banyak pengujian dan aplikasi pemakaian, tegangan maksimum terjadi pada permukaan.
 - b. Umur *fatigue* sensitif terhadap kondisi permukaan.
- c. Faktor lain yang harus dipertimbangkan adalah tegangan sisa permukaan

2.8 Macam-Macam Pengujian

Untuk mengetahui sifat dan karakteristik suatu material diperlukan yang namanya pengujian. Berikut beberapa macam pengujian untuk material

1. Uji kekerasan

Kekerasan suatu material dapat didefinisikan sebagai ketahanan material tersebut terhadap gaya penekanan dari material lain yang lebih keras. Kebanyakan uji kekerasan menggunakan metode indentasi. Pengujian dengan metode indentasi dilakukan dengan penekanan benda uji menggunakan indenter. Kekerasan suatu material ditentukan oleh dalamnya area ataupun luas area indentasi yang dihasilkan (tergantung jenis indenter dan jenis pengujian). Berdasarkan prinsip kerjanya metode uji kekerasan dengan cara indentasi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- a. Pengujian Brinell



Metode ini diperkenalkan pertama kali oleh J.A. Brinell pada tahun 1900. Pengujian kekerasan dilakukan dengan memakai bola baja yang dikeraskan (*hardened steel ball*) dengan beban dan waktu indentasi tertentu. Metode ini dilakukan seperti gambar 2.14. Hasil penekanan adalah jejak berbentuk lingkaran bulat, yang harus dihitung diameternya dibawah mikroskop khusus pengukur jejak. Pengukuran nilai kekerasan suatu material diberikan oleh rumus:

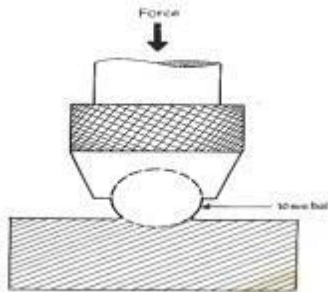
$$\text{BHN} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

dimana:

P = beban (kg)

D = diameter indenter (mm)

d = diameter jejak (mm)



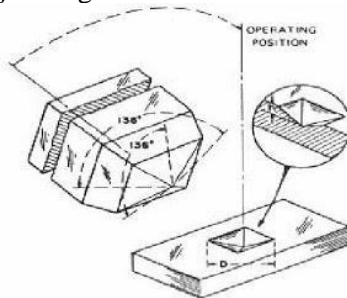
Gambar 2.14 Penekan oleh *Hardened Steel Ball* (ASTM E92-82)

b. Pengujian Vickers

Pada metode ini digunakan indenter intan berbentuk piramida dengan sudut 136° dengan beban 100kg. Prinsip pengujian adalah sama dengan metode Brinell, walaupun jejak yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal. Metode ini dilakukan seperti skema pada gambar 2.15. Nilai kekerasan suatu material diberikan oleh rumus:

$$\text{VHN} = \frac{1.854 P}{d^2}$$

dimana d adalah panjang diagonal rata-rata dari jejak berbentuk bujur sangkar



Gambar 2.15 Skematis Prinsip Indentasi dengan Metode Vickers (ASTM E92-82)

c. Pengujian Rockwell

Berbeda dengan metode Brinell dan Vickers dimana kekerasan suatu bahan dinilai dari diameter. Rockwell merupakan uji kekerasan dengan pembacaan langsung (*direct-reading*). Metode yang sering digunakan biasanya Rockwell tipe B dengan beban 100 kg serta Rockwell tipe C dengan indenter intan dan beban 150 kg.

2. Uji XRD

Uji XRD biasanya dilakukan untuk mengetahui fasa dari suatu material. Selain itu uji XRD juga bisa dilakukan untuk mengetahui jumlah tegangan sisa yang terdapat pada material. Mekanisme uji XRD yaitu dengan cara menembakkan electron dan elektron akan dibiaskan. Hasil dari pembiasan akan muncul di komputer.

3. Uji SEM

Uji SEM merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakterisasi permukaan dari suatu material. Mekanisme kerja dari mesin uji SEM ini yaitu ada electron yang ditembakkan kepada material. Kemudian dari penembakan elektron tersebut ada yang dibiaskan dan hasil dari pembiasan ini yang kemudian tampil pada komputer untuk dilihat hasil karakterisasi dari permukaan material tersebut.



4. Uji Metalografi

Metalografi merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui informasi-informasi yang ada didalam suatu material yang dapat diamati dengan mikroskop optic seperti fasa, butir, komposisi kimia dan sebagainya. Adapun langkah-langkah untuk melakukan uji metalografi yaitu:

- a. Pemilihan spesimen
- b. Pemotongan spesimen
- c. Pemingkaian (*mounting*)
- d. Penggerindaan (*grinding*)
- e. Pemolesan (*polishing*)
- f. Pengetsan (*etching*)
- g. Observasi pada mikroskop optic

5. Uji Komposisi

Uji komposisi kimia merupakan suatu pengujian untuk mengetahui kandungan unsur kimia yang terdapat pada suatu logam benda uji. Komposisi kimia dari logam sangat penting untuk diketahui karena komposisi kimia pada logam bias menentukan sifat dari logam tersebut. *Spectrometer* adalah alat yang mampu menganalisa unsur-unsur logam induk atau campurannya dengan akurat, cepat dan mudah dioperasikan.

2.9 Korosi

Korosi merupakan proses degradasi sifat material disebabkan reaksi dengan lingkungannya. Korosi sebagai suatu reaksi elektrokimia yang memberikan kontribusi kerusakan fisik suatu material secara signifikan sehingga perlu perhatian untuk mencegah dan meminimalisasi kerugian yang timbul akibat efek korosi (Fontana & Greene, 1978). Jumlah logam dan paduannya merupakan fungsi dari lingkungan sehingga saling mempengaruhi kedua parameter tersebut antara lain lingkungan air tawar, air laut, tanah, air laut (Callister & Rethwisch, 2014)

Pendekatan korosi secara umum melibatkan sifat material antara lain sifat fisik, mekanik dan kimia. Pendekatan lainnya juga mempertimbangkan struktur logam,



sifat lingkungan sekitar dan reaksi antara antar permukaan logam dan lingkungan. Faktor-faktor pendekatan korosi yaitu:

- Logam. Komposisi, struktur atom, keheterogenan struktur secara mikroskopik dan makroskopik, tegangan (tarik, tekan dan siklus)
- Lingkungan. Sifat kimia, konsentrasi bahan reaktif dan pengotor, tekanan, temperatur, kecepatan dan lain-lain
- Antar muka logam/lingkungan. Kinetika oksidasi dan pelarutan logam, kinetika proses reduksi bahan di dalam larutan, lokasi produk korosi dan pertumbuhan film dan pelarutan film.

Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron-elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi-oksidasi). (Gadang, 2008)

2.10 Penelitian Sebelumnya

Tian J.F., dkk (2013) melakukan penelitian tentang analisis kegagalan pisau tahap 1 pada turbin gas dan didapatkan kesimpulan bahwa pisau no. 62 adalah komponen yang rusak pertama yang memiliki banyak sumber kelelahan diantara empat bilah retak. No. 63, no.1, dan no. 2 adalah patah seketika yang timbul karena pisau no. 62 yang rusak. Ada beberapa porositas dan kavitasi membangkitkan konsentrasi 16 menyebabkan inisiasi dan memperbanyak retak lelah dan pauan akhir pada pisau no. 62.

Rani S, dkk (2016) melakukan penelitian tentang analisis kegagalan ujung pisau turbin gas IN738 tahap pertama retak di pembangkit listrik termal dan didapatkan kesimpulan bahwa komposisi kimia yang ditentukan dengan menggunakan spektrometer optical emission analyser, disimpulkan bahwa pisau tidak gagal karena cacat material. Dari mikrostruktur dan spektrum EDX diperoleh dengan menggunakan mikroskop pemindai

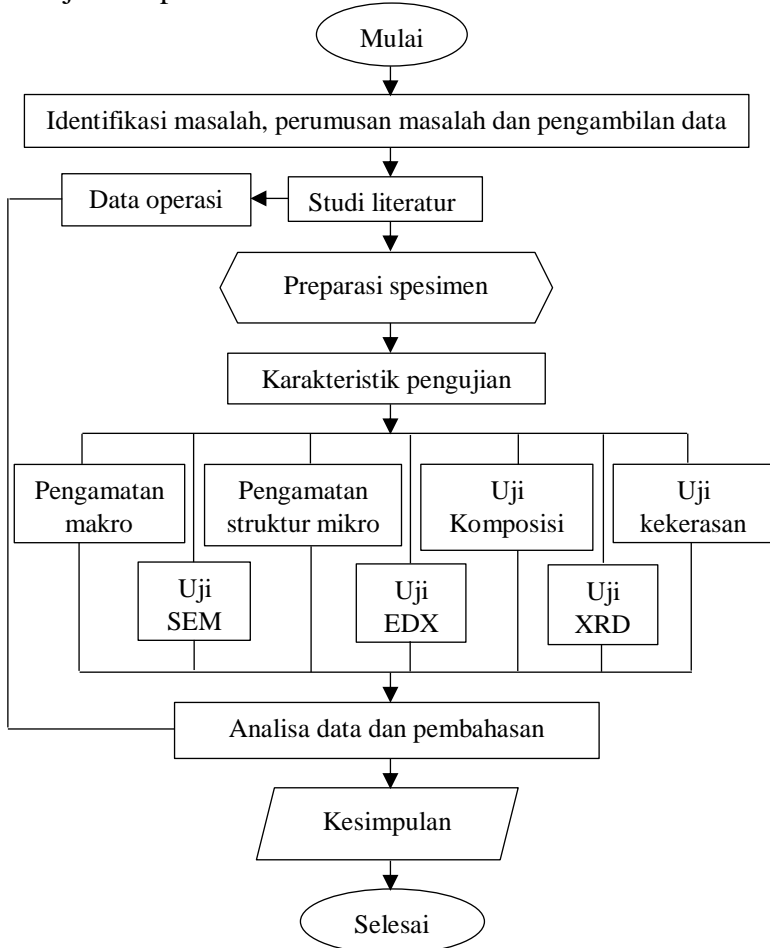


elektronik Hitachi S-3700N (SEM) yang dilengkapi dengan spectrometer disperse energi X-ray (EDS), dievaluasi bahwa sudu turbin gagal karena permukaan degradasi akibat panas berlebih, korosi panas dan oksidasi. Dalam kasus ini, degradasi lapisan terjadi karena oksidasi lapisan Al-Pt. Lapisan ini sangat teroksidasi dan menawarkan tidak ada perlindungan terhadap logam mulia. Warna gelap dari permukaan pisau adalah karena adanya oksidasi. Ditemukan bahwa pisau tersebut telah gagal karena efek gabungan dari degradasi permukaan yang disebabkan oleh overheating, oksidasi, korosi panas dan degradasi lapisan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan alur yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, studi literature dan pengujian. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara terjun langsung ke lapangan.

2. Studi Literatur

Metode studi literature mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal, dan situs industri yang mempelajari tentang permasalahan analisa kegagalan khususnya bagian dari turbin gas.

3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang diperlukan dalam experiment ini yaitu: uji komposisi untuk mengetahui komposisi dari *ring segment*, pengamatan mikro, pengamatan makro, dan uji kekerasan menggunakan Vickers untuk mengetahui kekerasan dari *ring segment* tersebut.

3.3 Material yang Digunakan

1. Material

Pada tanggal 2 September 2017 ditemukan *ring segment* pada turbin gas ada yang mengalami kepatahan seperti yang terlihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Ring Segment* pada Turbin Gas

2. Spesimen

Spesimen yang digunakan pada penelitian ini adalah *ring segment* yang patah pada turbin gas, diperlihatkan pada gambar 3.3 dan 3.4 berikut:



Gambar 3.3 *Ring Segment* yang patah



Gambar 3.4 Penampang Patahan *Ring Segment*

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Penggaris digunakan untuk mengukur spesimen.
2. Alat pemotong digunakan untuk memotong specimen.
3. Kamera digunakan untuk melihat kegagalan secara makro.
4. Mesin uji kekerasan digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari specimen.
5. Peralatan untuk pengujian metalografi seperti amplas *grade 80* sampai 2000, mesin polish, dan larutan etsa.
6. Mikroskop optik digunakan untuk mengetahui struktur mikro dari *ring segment*.
7. EDX digunakan untuk mengetahui identifikasi degradasi akibat oksidasi atau korosi dari *ring segment*.
8. SEM digunakan untuk mengetahui karakteristik pada permukaan patahan.
9. XRF digunakan untuk mengetahui komposisi utama material berbasis logam.
10. XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristal.



3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data-data pendukung yang berkaitan dengan material yang akan diteliti yaitu *ring segment* pada turbin gas, adapun data yang perlu didapatkan yaitu:

1. Data operasional.
2. Spesifikasi Material.

3.5.2 Pengujian Komposisi Unsur Kimia

Pengujian komposisi unsur kimia diperlukan untuk mengetahui jenis dari *ring segment* pada turbin gas. Hal ini dikarenakan tidak adanya dokumen mengenai data komposisi unsur kimia.

3.5.3 Pengamatan Makro

Pengamatan makro ini dibutuhkan agar kita tahu apa yang akan dilakukan dengan material ini dengan kondisi kegagalan yang terjadi. Sebelum dilakukan preparasi spesimen kita harus tau bagian mana yang akan diambil untuk diuji.

3.5.4 Preparasi Spesimen

Sebelum melakukan pengujian maka perlu dilakukan preparasi terlebih dahulu. Preparasi ini adalah pemotongan pada bagian *ring segment* daerah patahan dan yang jauh dari daerah patahan, hal ini dilakukan untuk membandingkan dengan kondisi yang rusak dan yang masih tergolong baik.

3.5.5 Pengujian Strukturmikro

Pada pengamatan strukturmikro dengan mikroskop optic dilakukan untuk menganalisis fasa, bentuk, dan ukuran strukturmikro. Hal ini digunakan untuk mengetahui proses manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik *Olympus BX51M-RF* yang terlihat pada gambar 3.5. Pada pengujian metallografi dibagi menjadi dua tahap, yaitu:

1. Tahap persiapan



- *Grinding*: Menggosok spesimen dengan kertas gosok *grade* 80-2000 dan dialiri dengan air. Spesimen diputar 90° atau tegak lurus terhadap arah gosokan ketika pindah *grade*.
- *Polishing*: Memoles spesimen dengan pasta alumina di atas piringan yang berputar cepat. Proses ini akan menghasilkan permukaan yang mengkilat seperti cermin.
- *Etching*: Mencilup permukaan spesimen ke dalam larutan etsa. Tidak hanya dengan cara dicelupkan tetapi ada acara lain yaitu dioleskan. Pengolesan etsa biasanya dilakukan apabila spesimen dengan cara pengetsaan yang dicelup gosong.

2. Tahap pengamatan

Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro spesimen dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran. Hal ini dimaksudkan agar struktur mikro yang akan diamati lebih jelas apabila memakai pembesaran yang sesuai.



Gambar 3.5 Mikroskop Optik *Olympus BX51M-RF*

3.5.6 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode

Vickers dimana dalam pengujiannya memakai indenter piramida intan, pembebanan sebesar 100 kg dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A* yang ditunjukkan pada gambar 3.6 di Laboratorium Metalurgi, Departemen Teknik Material ITS.



Gambar 3.6 Alat Uji kekerasan *Universal Hardness Tester HBRV 187.5A*

3.5.7 Pengujian SEM

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui informasi yang terdapat pada permukaan patahan suatu material. Pengujian ini dilakukan di Departemen Teknik Material dengan alat yang ditunjukkan pada gambar 3.7:



Gambar 3.7 Alat Uji SEM



3.5.8 Pengujian XRF

Pengujian XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi utama material berbahan logam. Pengujian ini dilakukan di Robutech Surabaya dengan alat yang ditunjukkan pada gambar 3.8:



Gambar 3.8 Alat Uji XRF

3.5.9 Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui karakterisasi Kristal dari material *shaft*. Pengujian ini dilakukan di Departemen Teknik Material dengan alat yang ditunjukkan pada gambar 3.9:



Gambar 3.9 Alat Uji XRD



3.6 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian pasa kasus ini ditunjukkan pada tabel 3.1:

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian

| Bahan | Pengujian | | | | | | |
|------------------------|-----------|-------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| | Makro | Mikro | Kekerasan | SEM | EDX | XRF | XRD |
| <i>Ring Segment 1</i> | √ | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| <i>Ring Segment 2</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |
| <i>Ring Segment 3</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |
| <i>Ring Segment 5</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |
| <i>Ring Segment 28</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |
| <i>Ring Segment 29</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |
| <i>Ring Segment 30</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |
| <i>Ring Segment 31</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |
| <i>Ring Segment 32</i> | √ | √ | √ | √ | √ | | √ |



(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisi Data

4.1.1 Data Operasional

Dalam cara kerja mesin turbin gas ini terdapat komponen yang mendukung kinerja turbin agar berjalan sesuai operasional, salah satunya adalah *ring segment* yang berfungsi sebagai penahan aliran fluida agar mengalir secara beraturan setelah dari proses pembakaran. Pada penelitian ini *ring segment* yang akan diteliti mengalami kegagalan yang berupa retakan yang menyebabkan patahan sehingga *ring segment* terbagi menjadi dua. Tabel 4.1 menjelaskan data operasional turbin gas. Tabel 4.2 dan 4.3 menjelaskan komposisi bahan bakar minyak dan gas yang digunakan.

Tabel 4.1 Data Operasional Turbin Gas

| | |
|--------------------------------|--------|
| KECEPATAN PUTARAN TURBIN (RPM) | 3000.5 |
| BEBAN KERJA (MW) | 71.13 |
| TEMPERATUR MASUK (°C) | 30.10 |
| TEMPERATUR KELUAR (°C) | 380.66 |
| TEMPERATUR PEMBUANGAN (°C) | 497.09 |

Tabel 4.2 Komposisi Bahan Bakar Minyak yang Digunakan

| Pengujian | Satuan | Metode | Hasil |
|------------------------------|--------|-------------|----------|
| Density @ 15°C | Kg/l | ASTM D-1298 | 0.9531 |
| Viscosity Kinematic at 100°F | cSt | ASTM D-445 | 1434 |
| Pour Point | °C | ASTM D-97 | -6.17 |
| Gross Caloric Value | Btu/lb | ASTM D-240 | 19864.50 |
| Sulfur Content | % wt | ASTM D-129 | 0.29 |
| Sediment | % wt | ASTM D-473 | 0.12 |
| Water Content | % vol | ASTM D-95 | 0.29 |



| | | | |
|---------------------|-----|-------------|----|
| Vanadium | Ppm | ASTM D-6373 | 29 |
| Aluminium + Silicon | Ppm | ASTM D-6373 | 14 |

Tabel 4.3 Komposisi Bahan Bakar Gas yang Digunakan

| Komposisi Gas | Simbol | % Mole | Error | Metode Uji |
|----------------|----------------------------------|--------|---------|----------------|
| Methane | CH ₄ | 94.52 | ±0.3563 | IKG.17.1.3.130 |
| Ethane | C ₂ H ₆ | 2.66 | ±0.0104 | |
| Propane | C ₃ H ₈ | 1.45 | ±0.0060 | |
| n-Butane | N-C ₄ H ₁₀ | 0.24 | ±0.0033 | |
| Isobutane | I-C ₄ H ₁₀ | 0.25 | ±0.0027 | |
| n-Pentane | N-C ₅ H ₁₂ | 0.07 | ±0.0039 | |
| Isopentane | I-C ₅ H ₁₂ | 0.17 | ±0.0096 | |
| Hexane Plus | C ₆ H ₁₄ + | 0.10 | ±0.0128 | |
| Nitrogen | N ₂ | 0.38 | ±0.0162 | |
| Carbon Dioxide | CO ₂ | 0.14 | ±0.0006 | |
| Oxygen | O ₂ | 0.01 | ±0.0002 | |

4.1.2 Hasil Pengujian Komposisi Kimia Material *Ring Segment*

Pengujian ini dilakukan untuk mengamati komposisi kimia pada *ring segment* dengan menggunakan XRF. Berdasarkan ASTM A567 hasil yang didapatkan menunjukkan material *ring segment* yang digunakan untuk komponen dalam turbin gas ini mirip dengan material *cobalt base superalloys X40*. Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian yang dicocokkan dengan salah satu unsur ASTM A567.

Tabel 4.4 Pencocokan Hasil Uji Komposisi *ring segment* dengan ASTM A567

| Unsur (%) | Spesimen ring segment | X40 (ASTM A567) |
|-----------|-----------------------|-----------------|
| Cr | 24.59 | 24.50-26.50 |

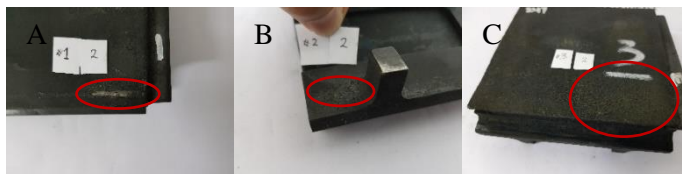


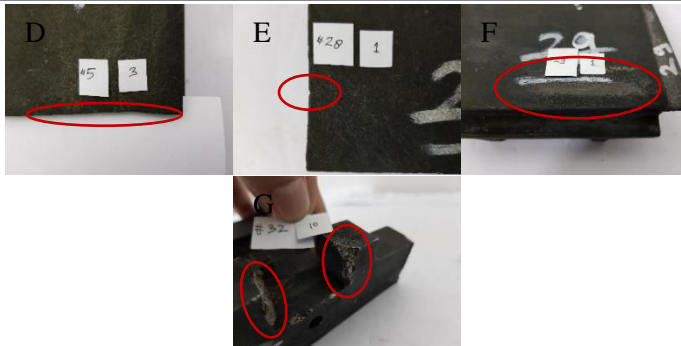
| | | |
|----|-------|-------------|
| Mn | 0.76 | 0.00-1.00 |
| Fe | 0.53 | 0.00-2.00 |
| Co | 53.63 | 49.45-56.55 |
| Ni | 11.66 | 9.50-11.50 |
| Nb | 0.02 | - |
| W | 7.17 | 7.00-8.00 |

Tabel 4.4 merupakan komposisi kimia dari *ring segment* yang memiliki kesesuaian dengan ASTM A567, dengan komposisi seperti itu dapat dikatakan material tersebut merupakan material *superalloys* dengan *cobalt base* yaitu X40. *Ring segment* yang diteliti tidak memiliki data komposisi kimia sebelumnya, sehingga untuk mengetahuinya perlu dilakukan pengujian komposisi.

4.1.3 Hasil Pengamatan Makroskopik Material *Ring Segment*

Pengamatan makroskopik dilakukan untuk mengamati cacat yang terdapat pada material dengan mata telanjang. *Ring segment* yang diamati adalah bagian yang tidak mengalami kegagalan dan bagian yang mengalami kegagalan, dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



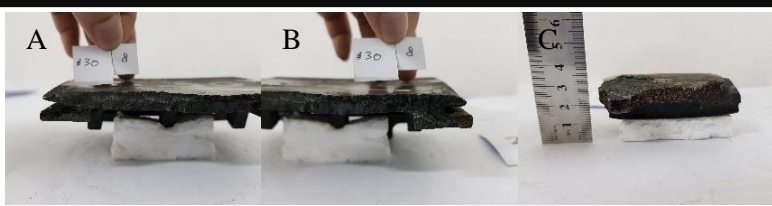


Gambar 4.1 Cacat pada Material *Ring Segment* yang Tidak Mengalami Kegagalan (a) Material dengan Kode 1 (b) Material dengan Kode 2 (c) Material dengan Kode 3 (d) Material dengan Kode 5 (e) Material dengan Kode 28 (f) Material dengan Kode 29 (g) Material dengan Kode 32

Pada Gambar 4.1 terlihat berbagai macam cacat yang terdapat pada material *ring segment* tidak mengalami kegagalan, sedangkan pada Gambar 4.2 terlihat jelas permukaan dari *ring segment* yang mengalami kegagalan. Kegagalan *ring segment* ini bisa dilihat dari adanya awal retakan (*crack initiation*), perambatan retak (*crack propagation*) yang ditandai dengan munculnya garis pantai dan akhir patahan (*final fracture*) dengan patahan yang kasar bisa dilihat pada Gambar 4.3.



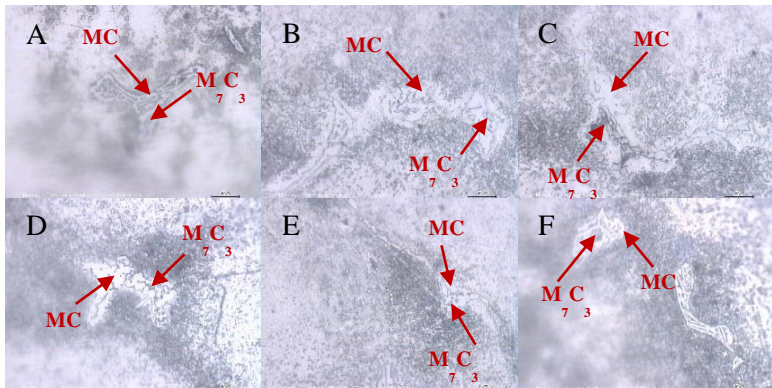
Gambar 4.2 Permukaan Patahan *Ring Segment* (a) Bagian Atas dengan Kode 30 (b) Bagian Bawah dengan Kode 30 (c) Bagian yang Hancur dengan Kode 31

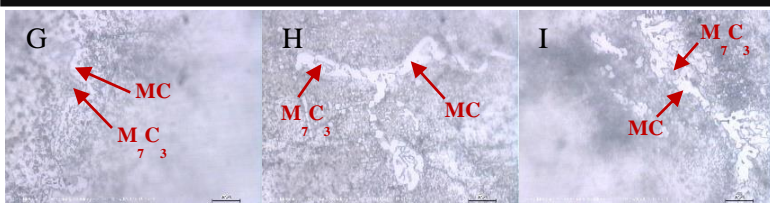


Gambar 4.3 Pola Patahan *Ring Segment* (a) Awal Pola Patahan dengan Kode 30 (b) Akhir Pola Patahan dengan Kode 30 (c) Pola Patahan dengan Kode 31

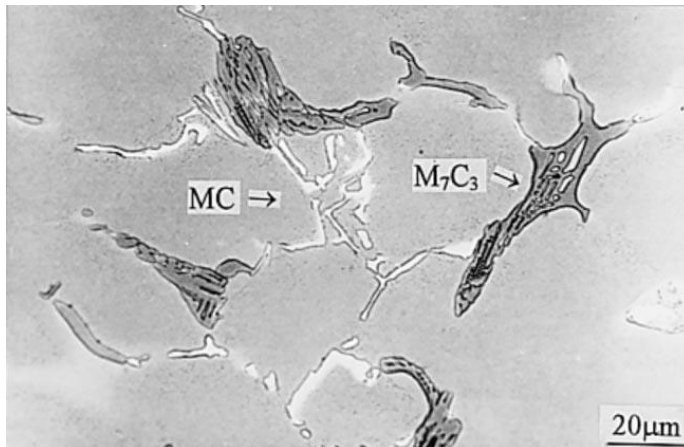
4.1.4 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Material *Ring Segment*

Pengamatan ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik, pengamatan yang dilakukan untuk *ring segment* ini adalah material yang tidak mengalami kegagalan dan yang mengalami kegagalan. Sehingga dapat diketahui apakah terjadi perubahan struktur mikro yang nantinya berpengaruh pada perubahan sifat material yang dapat memicu terjadinya retakan yang berujung pada sebuah patahan. Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar di bawah ini.





Gambar 4.4 Hasil Metalografi pada Permukaan *Ring Segment* (a) Material dengan Kode 1 (b) Material dengan Kode 2 (c) Material dengan Kode 3 (d) Material dengan Kode 5 (e) Material dengan Kode 28 (f) Material dengan Kode 29 (g) Material dengan Kode 30 (h) Material dengan Kode 31 (i) Material dengan Kode 32

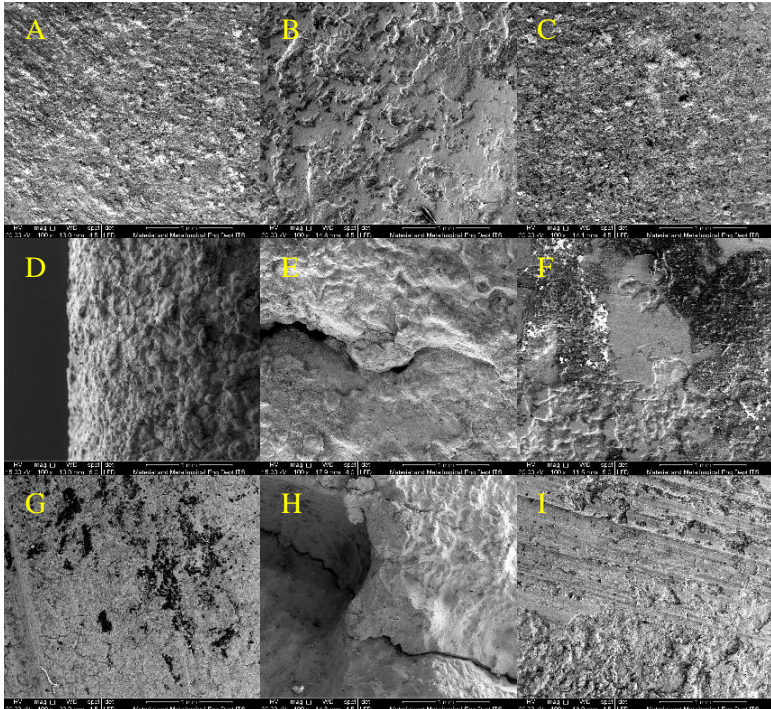


Gambar 4.5 Hasil Metalografi pada Material *Cobalt Base Superalloys* DZ40M Sebagai Cetakan (Jiang, 1999)

4.1.5 Hasil Pengamatan SEM (*Scanning Electron Microscope*) Material *Ring Segment*

Pengamatan ini dilakukan untuk mengamati morfologi permukaan material, pengamatan yang dilakukan untuk *ring segment* ini adalah material yang tidak mengalami kegagalan dan bagian yang mengalami kegagalan, dengan melihat morfologi

permukaannya dapat diketahui penyebab terjadinya kegagalan, hasil dari pengujian SEM dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.6 Morfologi pada Permukaan *Ring Segment* (a) Material dengan Kode 1 (b) Material dengan Kode 2 (c) Material dengan Kode 3 (d) Material dengan Kode 5 (e) Material dengan Kode 28 (f) Material dengan Kode 29 (g) Material dengan Kode 30 (h) Material dengan Kode 31 (i) Material dengan Kode 32

4.1.6 Hasil Pengujian EDX Material *Ring Segment*

Pengujian EDX ini dilakukan untuk mengetahui unsur apa saja yang terdapat dalam permukaan *ring segment*. Sehingga dapat diketahui unsur apa saja yang berpotensi untuk menyebabkan



kegagalan pada material *ring segment*. Untuk hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 1

| Element | Wt% | At% |
|---------------|------------|-------|
| CK | 16.74 | 37.23 |
| OK | 17.26 | 28.81 |
| NaK | 01.04 | 01.21 |
| MgK | 00.80 | 00.88 |
| AlK | 01.66 | 01.64 |
| SiK | 01.04 | 01.94 |
| MoL | 01.44 | 00.40 |
| ClK | 00.58 | 00.44 |
| Cak | 01.21 | 00.81 |
| CrK | 03.98 | 02.04 |
| MnK | 01.36 | 00.66 |
| FeK | 16.76 | 08.02 |
| CoK | 31.46 | 14.26 |
| NiK | 03.67 | 01.67 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.6 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 2

| Element | Wt% | At% |
|---------------|------------|-------|
| CK | 12.46 | 37.01 |
| OK | 08.79 | 19.59 |
| WM | 14.41 | 02.80 |
| CrK | 19.99 | 13.71 |
| MnK | 00.88 | 00.57 |
| CoK | 34.90 | 21.12 |
| NiK | 08.57 | 05.21 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.7 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 3

| Element | Wt% | At% |
|---------|-----|-----|
|---------|-----|-----|



| | | |
|---------------|------------|-------|
| CK | 16.09 | 36.60 |
| OK | 16.33 | 27.89 |
| NaK | 01.86 | 02.21 |
| MgK | 00.81 | 00.91 |
| AlK | 01.44 | 01.46 |
| SiK | 01.69 | 01.64 |
| PK | 00.38 | 00.34 |
| PbM | 01.57 | 00.21 |
| CaK | 01.35 | 00.92 |
| VK | 00.47 | 00.25 |
| CrK | 05.36 | 02.82 |
| MnK | 01.76 | 00.88 |
| FeK | 10.39 | 05.09 |
| CoK | 35.26 | 16.53 |
| NiK | 05.23 | 02.43 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.8 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 5

| Element | Wt% | At% |
|----------------|------------|------------|
| CK | 09.99 | 25.19 |
| OK | 18.04 | 34.15 |
| MgK | 02.17 | 02.70 |
| AlK | 01.11 | 01.24 |
| SiK | 01.85 | 01.99 |
| CrK | 03.18 | 01.85 |
| FeK | 04.45 | 02.41 |
| CoK | 48.51 | 24.93 |
| NiK | 10.72 | 06.53 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.9 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 28

| Element | Wt% | At% |
|----------------|------------|------------|
| CK | 09.96 | 23.45 |
| OK | 22.24 | 39.30 |



| | | |
|---------------|------------|-------|
| NaK | 01.62 | 01.99 |
| MgK | 01.11 | 01.29 |
| AlK | 01.53 | 01.60 |
| SiK | 01.56 | 01.57 |
| MoL | 01.88 | 00.55 |
| ClK | 01.20 | 00.96 |
| CaK | 02.77 | 01.95 |
| CrK | 06.41 | 03.48 |
| CoK | 49.73 | 23.85 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.10 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 29

| Element | Wt% | At% |
|----------------|------------|------------|
| CK | 13.55 | 32.02 |
| OK | 14.22 | 25.21 |
| AlK | 02.14 | 02.25 |
| SiK | 01.98 | 02.00 |
| ClK | 10.96 | 08.78 |
| CaK | 07.75 | 05.49 |
| CrK | 05.46 | 02.98 |
| FeK | 03.80 | 01.93 |
| CoK | 30.10 | 14.50 |
| NiK | 10.02 | 04.85 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.11 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 30

| Element | Wt% | At% |
|----------------|------------|------------|
| CK | 04.22 | 12.77 |
| OK | 13.53 | 30.69 |
| AlK | 01.38 | 01.85 |
| SiK | 03.32 | 04.29 |
| SK | 01.42 | 01.61 |
| TiK | 01.81 | 01.37 |
| CrK | 18.82 | 13.14 |



| | | |
|---------------|------------|-------|
| MnK | 00.00 | 00.00 |
| FeK | 00.89 | 00.58 |
| CoK | 25.67 | 15.81 |
| NiK | 28.93 | 17.89 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.12 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 31

| | | |
|----------------|------------|------------|
| Element | Wt% | At% |
| CK | 05.96 | 17.00 |
| OK | 15.03 | 32.19 |
| SiK | 04.45 | 05.43 |
| CaK | 01.94 | 01.66 |
| CrK | 15.82 | 10.43 |
| MnK | 02.59 | 01.61 |
| FeK | 03.73 | 02.29 |
| CoK | 41.56 | 24.17 |
| NiK | 08.94 | 05.22 |
| Matrix | Correction | ZAF |

Tabel 4.13 Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 32

| | | |
|----------------|------------|------------|
| Element | Wt% | At% |
| CK | 09.09 | 24.63 |
| OK | 13.07 | 26.59 |
| AlK | 02.09 | 02.52 |
| SiK | 02.34 | 02.72 |
| ClK | 03.58 | 03.28 |
| CrK | 20.64 | 12.92 |
| MnK | 01.39 | 00.82 |
| FeK | 02.92 | 01.70 |
| CoK | 26.49 | 14.63 |
| NiK | 18.39 | 10.19 |
| Matrix | Correction | ZAF |



4.1.7 Hasil Pengujian Kekerasan Material *Ring Segment*

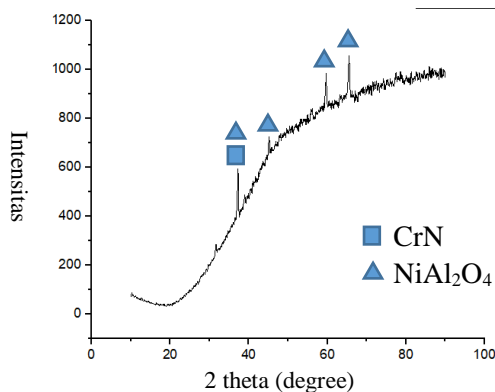
Dari hasil pengujian kekerasasn dapat dilihat pada tabel 4.14 di bawah ini.

Tabel 4.14 Hasil Uji Kekerasan *Ring Segment*

| Sampel | Titik | | | HVN |
|------------------------|-------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | |
| <i>Ring Segment 1</i> | 302 | 326 | 387 | 338 |
| <i>Ring Segment 2</i> | 339 | 340 | 338 | 339 |
| <i>Ring Segment 3</i> | 303 | 311 | 306 | 306 |
| <i>Ring Segment 5</i> | 299 | 326 | 319 | 314 |
| <i>Ring Segment 28</i> | 321 | 328 | - | 324 |
| <i>Ring Segment 29</i> | 374 | 381 | 368 | 374 |
| <i>Ring Segment 30</i> | 324 | 303 | 302 | 310 |
| <i>Ring Segment 31</i> | 326 | 321 | 326 | 324 |
| <i>Ring Segment 32</i> | 378 | 305 | 316 | 333 |

4.1.8 Hasil Pengujian XRD Material *Ring Segment*

Dari hasil pengujian XRD ini dapat dilihat dari gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.7 Hasil Pengujian XRD



4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan menggunakan XRF menunjukkan bahwa material *ring segment* cocok dengan material *cobalt base superalloys* X40 yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. *Ring segment* ini merupakan material paduan super dengan berbasis kobalt, yang biasanya dalam dunia industri digunakan sebagai material komponen turbin gas yang tahan terhadap temperatur tinggi yang bisa mencapai lebih dari 100°C. Kegagalan yang terjadi pada material *ring segment* ini bukan disebabkan kesalahan pemilihan material. Kegagalan yang terjadi bisa saja disebabkan karena kondisi operasi yang berlebihan, cacat produksi, dan pemeriksaan yang kurang baik (Brooks, 2002).

Ring segment dalam cara kerjanya menerima beban fluida dengan temperatur tinggi yang mengalir dari hasil pembakaran sebelumnya yang bisa mencapai 400°C, serta mendapat beban gesekan fluida dari *blade* turbin yang berputar dengan kecepatan 3000 rpm, fungsi dari *ring segment* sendiri adalah menjaga aliran fluida di dalam turbin agar tetap stabil. *Ring segment* ini memiliki dimensi dengan panjang 13 cm, lebar 12 cm, dan tebal 4 cm, dengan dimensi yang dimiliki seperti itu susunan dari *ring segment* ini memiliki keliling sepanjang 780 cm dan diameter 248 cm dengan susunan *ring segment* secara melingkar sebanyak 60 buah.

Dari pengujian struktur mikro pada Gambar 4.4 didapatkan struktur mikro sepenuhnya karbida yang mendukung karakterisasi material ini sebagai *cobalt base superalloys* dan juga sesuai dengan diagram fasa Co-Cr bahwa struktur mikro dengan kadar Cr 24.59% adalah karbida primer dan karbida sekunder. Dari hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.4 memiliki struktur mikro kolumnar yang menandakan material ini adalah hasil dari cetakan. Dari semua hasil pengujian struktur mikro yang dilakukan dengan acuan temperatur kerja yang dioperasikan mencapai 400°C terbentuk susunan kristal FCC yang memiliki sifat ketangguhan yang tinggi. Menurut penelitian Wen, 2017 munculnya karbida dikarenakan adanya pemanasan berlebih



dengan waktu yang lama. Karbida muncul pada temperatur 699,85°C dengan tempo 50 jam. Karbida dan terdapatnya dimensi sisi seal strips yang tidak regular mendakan adanya pemanasan berlebih dengan tempo yang relatife lama. Data record dari turbin gas yang beroperasi selama ± 70080 jam atau ± 8 tahun menjadi salah satu faktor terdapatnya karbida.

Dari hasil pengamatan makroskopik pada Gambar 4.3 dapat dilihat dengan jelas pola patahan dengan adanya *initial crack* atau awal retakan yang terdapat di bagian pinggir *ring segment*. Awal retakan terjadi pada daerah tersebut karena pada daerah tersebut terdapat celah antara *ring segment* yang dimana di dalamnya terdapat *seal strip* sebagai penyambung antara *ring segment*, dengan adanya celah tersebut fluida yang seharusnya mengalir secara stabil dapat berubah menjadi aliran yang trubulensi, sehingga berpotensi menyebabkan rusaknya lapisan oksida pada material *ring segment*, aliran fluida yang trubulensi tersebut terbentuk selain karena adanya celah antara *ring segment* juga disebabkan oleh *blade* turbin yang berputar dengan kecepatan tinggi. Dari hasil trubulensi fluida tersebut terbentuklah *pitting corrosion* yang menyebabkan timbulnya retakan kecil, dari retakan kecil tersebut dapat merambat, rambatan retak disebabkan oleh kondisi di dalam turbin yang memiliki getaran yang sangat kuat serta ditambah dengan aliran fluida yang terus mengalir dan juga temperatur kerja yang sangat tinggi dapat mempercepat perambatan retak, retak mulai menjalar dan akhirnya menyebabkan patahan yang berujung pada sisi sebrang dari awal retakan. Pada bagian tengah permukaan patahan material *ring segment* dapat dilihat adanya garis striasi yang halus. Penjalaran retak di sepanjang permukaan patahan ditandai dengan adanya garis pantai, sedangkan pada akhir patahan terlihat dengan jelas permukaannya lebih kasar.

Dilihat dari pola patahan yang dimiliki *ring segment* ini merupakan pola patahan akibat benturan dengan material lain atau dengan aliran fluida secara terus-menerus yang selanjutnya membentuk sebuah retakan kecil yang ditunjukkan dari hasil



pengujian SEM pada Gambar 4.6 E dan H, selain dari munculnya retak sebagai awal dari patahan, pengelupasan pada permukaan *ring segment* juga sebagai penyebab kegagalan yang bisa dilihat dari hasil pengujian SEM pada Gambar 4.6 B, F, G dan I. Pengelupasan permukaan atau bisa juga disebut delaminasi ini adalah awal dari terbentuknya retakan kecil yang nantinya berujung pada patahan, pengelupasan ini merupakan lapisan oksida yang terkikis oleh fluida yang terdapat di dalam turbin dan berlangsung secara terus-menerus, selanjutnya ada oksigen yang menyerang material *ring segment* tersebut sehingga mulai terbentuk *pitting corrosion*, dimana itu adalah awal penyebab retakan kecil yang terjadi.

Dari hasil kekerasan yang didapatkan material *ring segment* ini memiliki hasil kekerasan dibawah standar dari ASTM A567, yaitu berada diantara 350 – 570 HVN. Dari hasil yang didapatkan material yang mengalami kegagalan adalah material dengan kode 30 dan 31 memiliki angka kekerasan yang rendah, bisa dilihat pada Tabel 4.14. Menurunnya kekerasan bisa diakibatkan karena material mengalami korosi, berkurangnya dimensi, serta perubahan batas butir.

Selanjutnya hasil yang didapatkan dari pengujian XRD ini didapatkan beberapa deposit yaitu CrN dan NiAl_2O_4 serta karbida yang terbentuk adalah TiC. Dari penggunaan aplikasi HighScore Plus didapatkan hasil yang *match* dengan *reference number* 00-001-1299 yaitu $\text{Ni Al}_2\text{O}_4$ dengan nilai (*score*) 12, kemudian hasil yang *match* dengan *reference number* 03-065-6914 yaitu CrN dengan nilai 6, dan hasil berikutnya yang *match* dengan *reference number* 00-031-1400 yaitu TiC dengan nilai 6. Pada hasil pengujian didapatkan kandungan di beberapa titik puncak seperti pada Gambar 4.6. Untuk hasil lebih lanjut, dilakukan pengujian EDX untuk melihat komposisi unsur yang terdapat pada permukaan material *ring segment*. Terlihat bahwa unsur O pada permukaan material *ring segment* yang memiliki jumlah paling banyak, hal ini dibuktikan dengan presentase O yang tinggi pada setiap kode *ring segment* hasil pengujian EDX. Munculnya unsur



O pada hasil pengujian EDX disebabkan oleh kandungan dari *thermal barrier coating* yang memiliki kandungan TiO_2 , selain dari unsur O yang dihasilkan pada permukaan material terdapat juga unsur Ti yang berpengaruh pada pembentukan karbida.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Faktor penyebab kegagalan:
 - a. Kondisi operasional turbin gas yaitu temperatur yang sangat tinggi.
 - b. Beban dari aliran fluida yang menyebabkan erosi dan mengakibatkan penipisan material.
 - c. Beban terus-menerus yang diterima dari *blade* turbin.
2. Mekanisme kegagalan pada material *ring segment* ini diawali dengan rusaknya lapisan oksida, kerusakan ini menyebabkan *crack*, kemudian *crack* mengalami perambatan sehingga material *ring segment* mengalami patahan.
3. Cara penanggulangan adalah sebagai berikut:
 - a. Pengecekan material sebelum dipasang sesuai prosedur.
 - b. Pengontrolan operasional turbin dilakukan secara berkala.

5.2 SARAN

Saran yang bisa diberikan untuk penelitian ini yaitu:

1. Pemotongan sebaiknya menggunakan *wirecut* agar tidak terjadi perubahan fasa.
2. Penggunaan aplikasi untuk pengolahan data dari hasil pengujian sebainya lebih baik.
3. Melakukan pengecekan secara rutin agar masalah yang terjadi bisa diketahui secara dini.



(halaman ini sengaja dikosongkan)

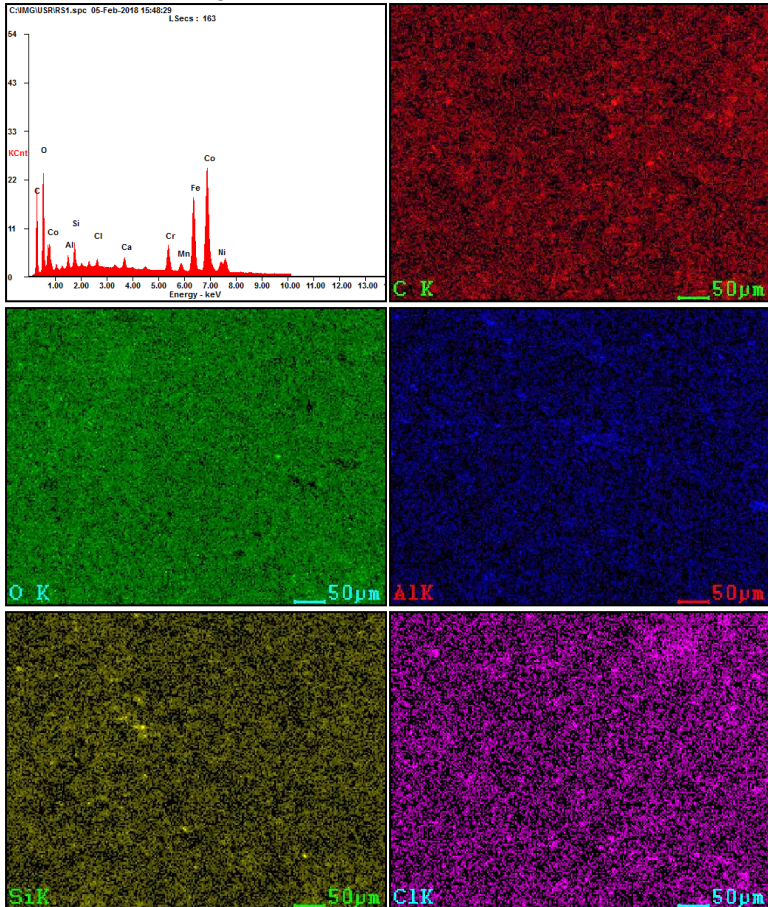
DAFTAR PUSTAKA

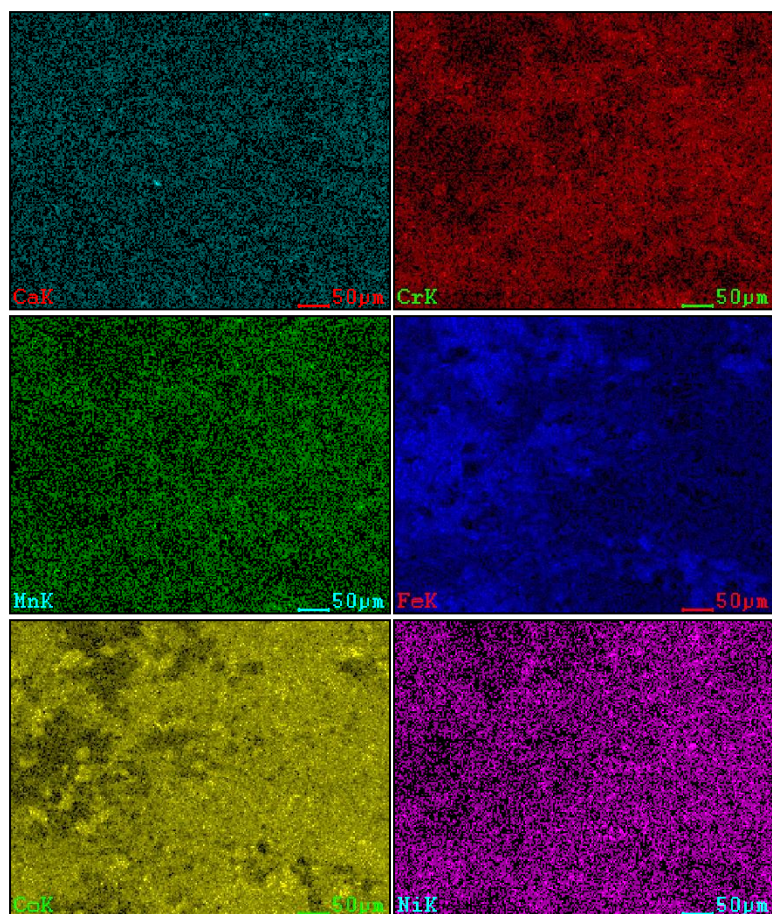
- _____, 2003. ASTM E92-82: *Standard Test Method for Vickers Hardness for Metallic Material*. Material Park: ASTM International
- _____, 2002. *ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture*. Material Park. Ohio. USA. ASM International
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co
- Boyce, Meherwan P. *Gas Turbine Engineering Handbook (3ed)*. Houston: Gulf Professional Publishing
- Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw-Hill
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering an Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc
- Candraditya, B. *Analisa Kegagalan Pada Material Mixing Chamber Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Gas di PLN Muara Tawar*. 2009. Universitas Indonesia
- Cobalt-base-superalloy, X-40, cast datasheet. <URL: http://data.grantadesign.com/materialuniverse/metalsandalloys/cobalt-base-superalloy_x-40_cast >.
- Cobalt-base-superalloy, X-40, composition. <URL: http://www.cypressindustrial.com/tables/nickel_and_cobalt_alloy_investment_castings_4.htm>.
- Gui, Weimin dkk. 2016. *The investigation of carbides evolution in a cobalt-base superalloy at elevated temperature*. Shenyang
- Henhoeffter, T dkk 2010. *Microstructure and high temperature tensile properties of wide gap brazed cobalt based superalloy X-40*. Maney on Behalf of the Institute
- Jiang, W.H. dkk. 1999. *Effects of heat treatment on microstructures and mechanical properties of a directionally solidified cobalt-base superalloy*. Shenyang: Shenyang Polytechnic University

- Kumari, S dkk 2014. *Failure analysis of gas turbine rotor blades*. Kanchanbagh
- Luna, A dkk 2016. *Microstructural Changes during High Temperature Service of a Cobalt-Based Superalloy First Stage Nozzle*. Mexico
- Nishida, Shin-ichi. 1992. *Failure Analysis in Engineering Application*. Oxford: Butterworth- Heinemann
- Pond, Robert B, Jr. 2004. *ASM vol 11: Failure Analysis and Prevention: High Temperature Corrosion Failures*. ASM International
- Qu, S dkk. 2013. *Failure analysis of the 1st stage blades in gas turbine engine*. Shenyang
- Rani, Sushila dkk. 2016. *Failure analysis of a first stage IN738 gas turbine blade tip cracking in a thermal power plant*. Delhi: Delhi Technological University
- William TB, Roch JS. 1975. *ASM handbook vol 10: failure analysis and prevention, metals handbook. 8th ed*. Materials Park: ASM International
- Zangeneh, Sh dkk. 2010. *Influence of service-induced microstructural changes on the failure of a cobalt-based superalloy first stage nozzle*. Tehran: University of Tehran

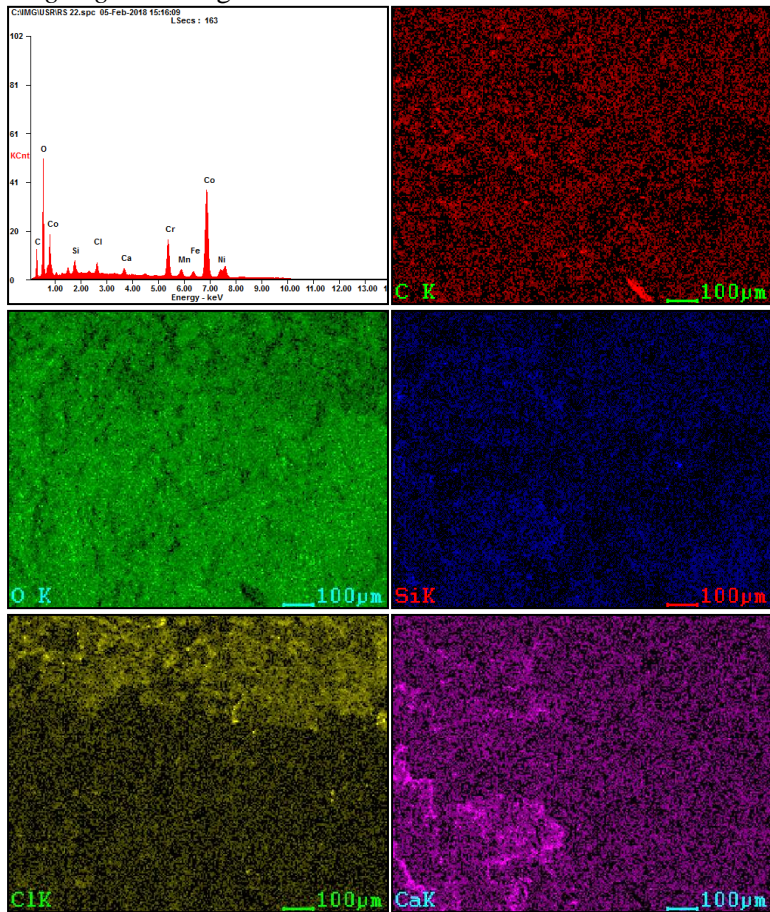
LAMPIRAN

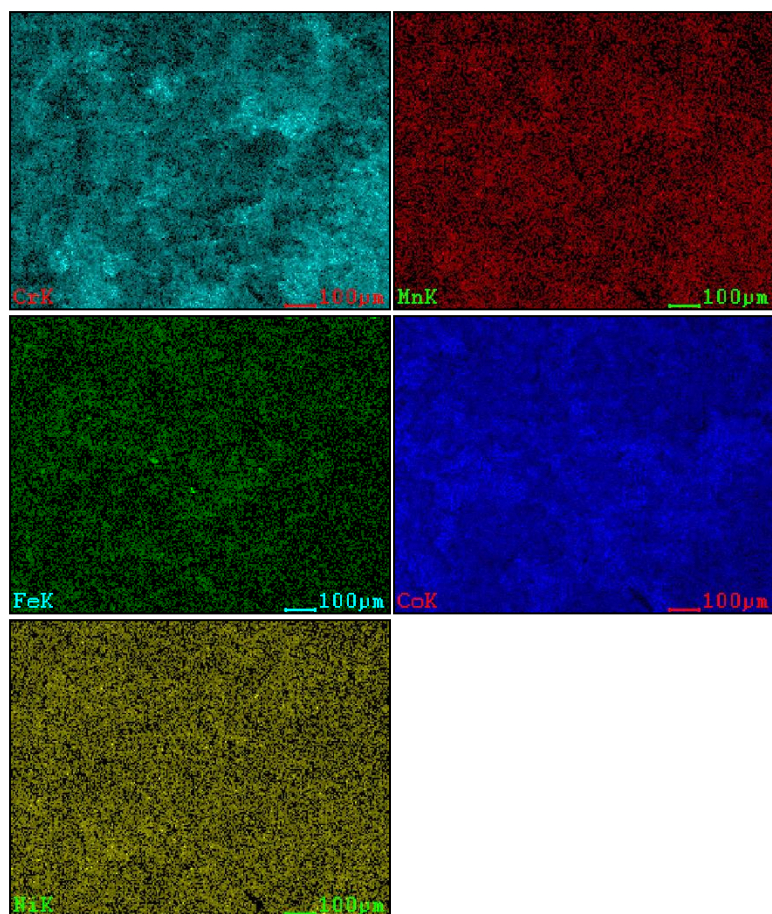
Hasil Pengujian EDX *Ring Segment* dengan Kode 1



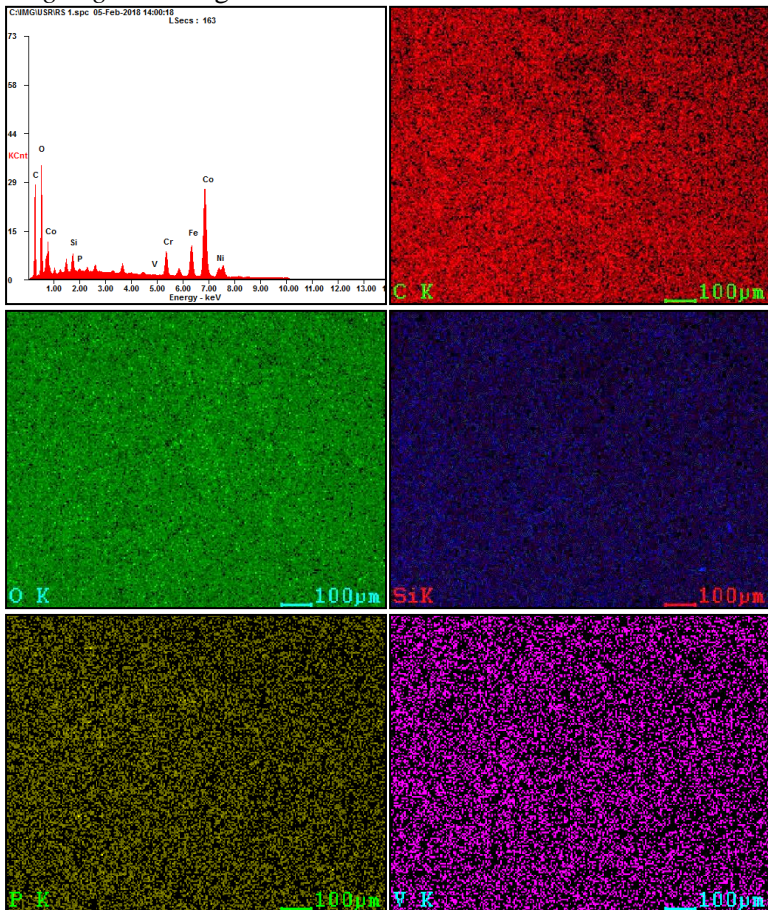


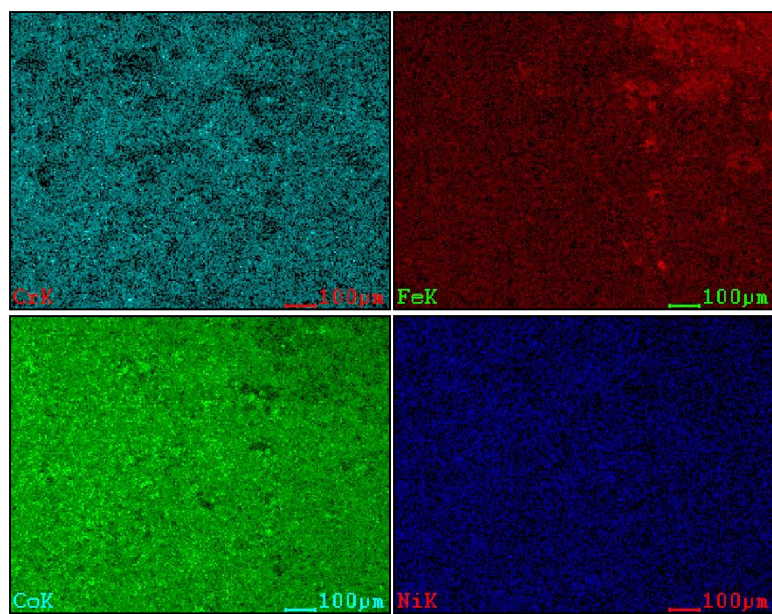
Ring Segment dengan Kode 2



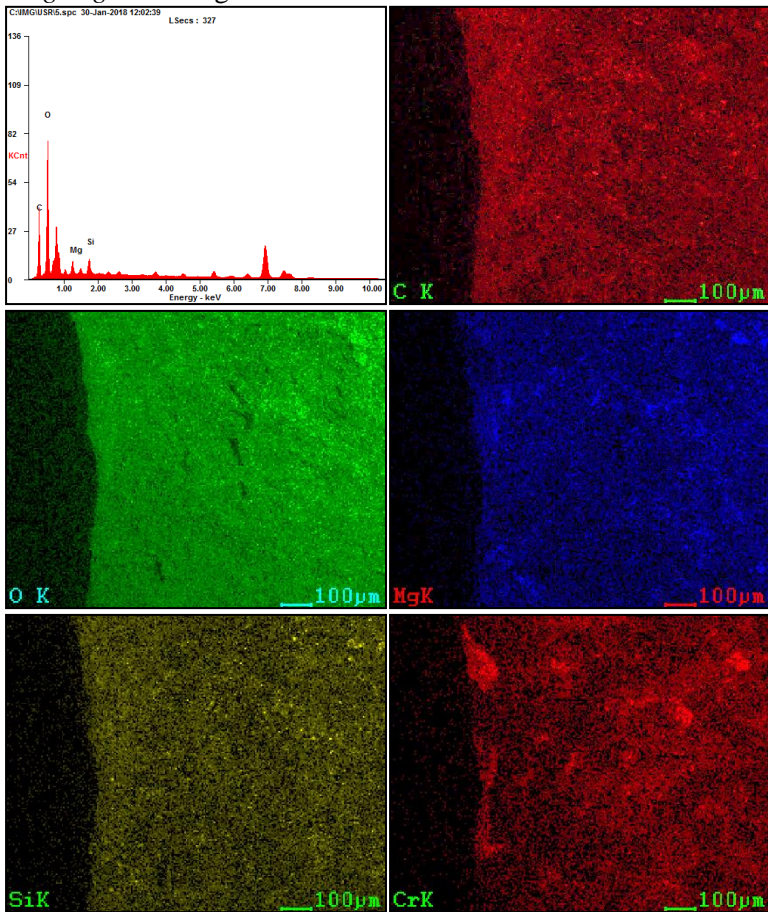


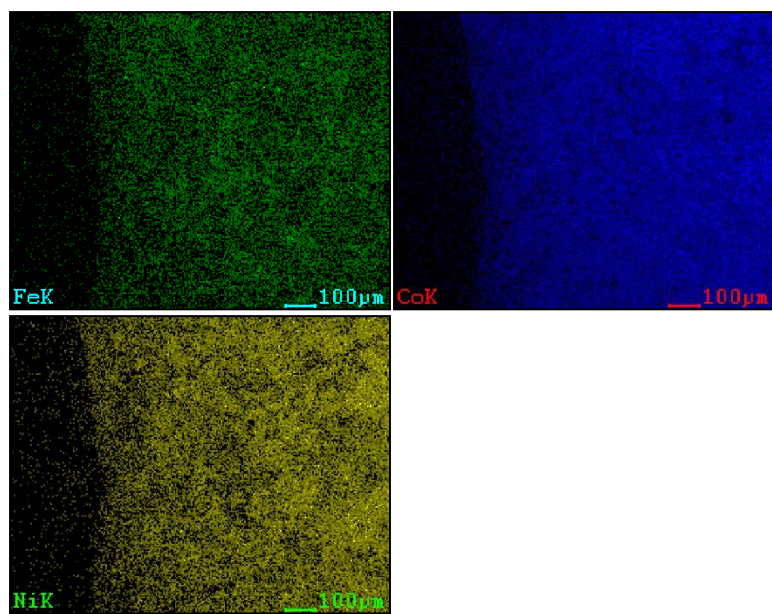
Ring Segment dengan Kode 3



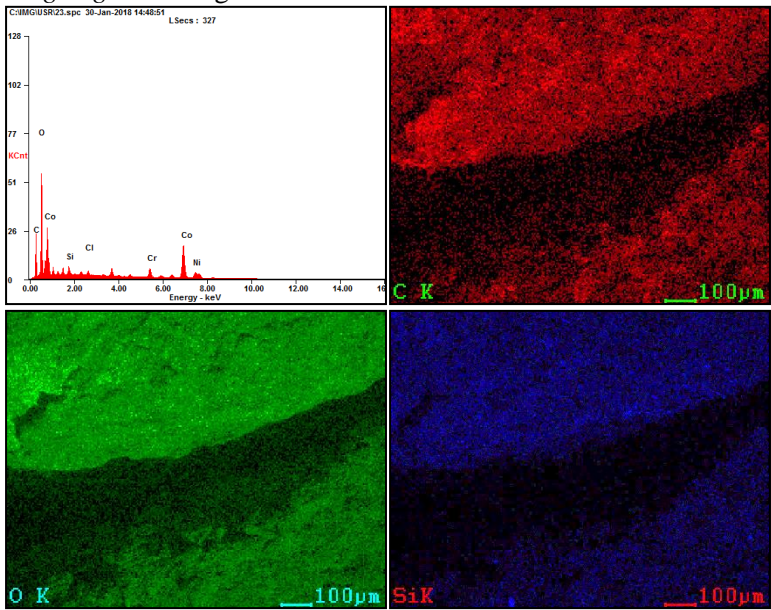


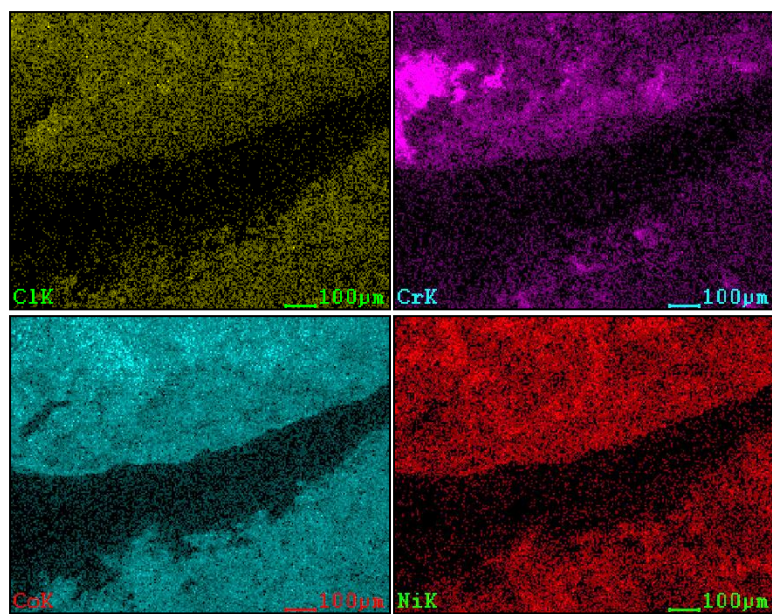
Ring Segment dengan Kode 5



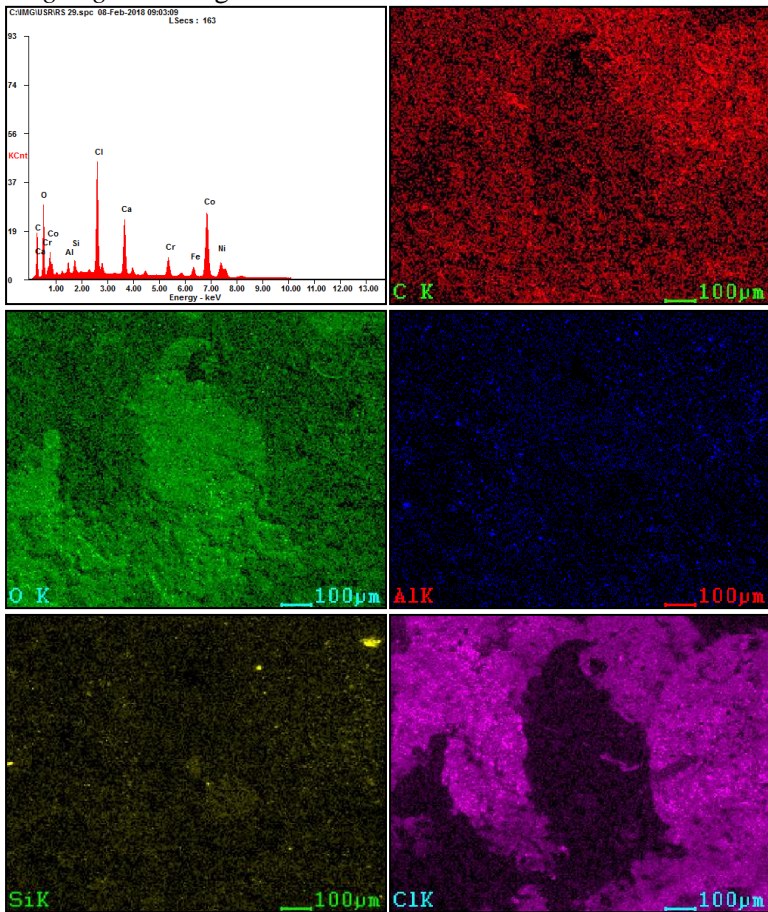


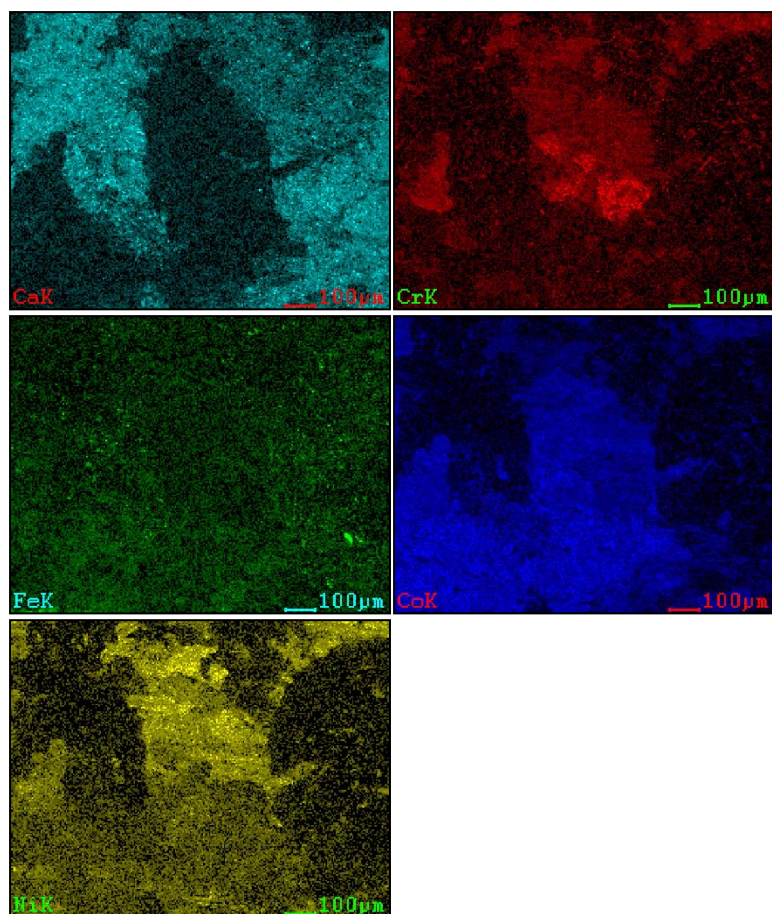
Ring Segment dengan Kode 28



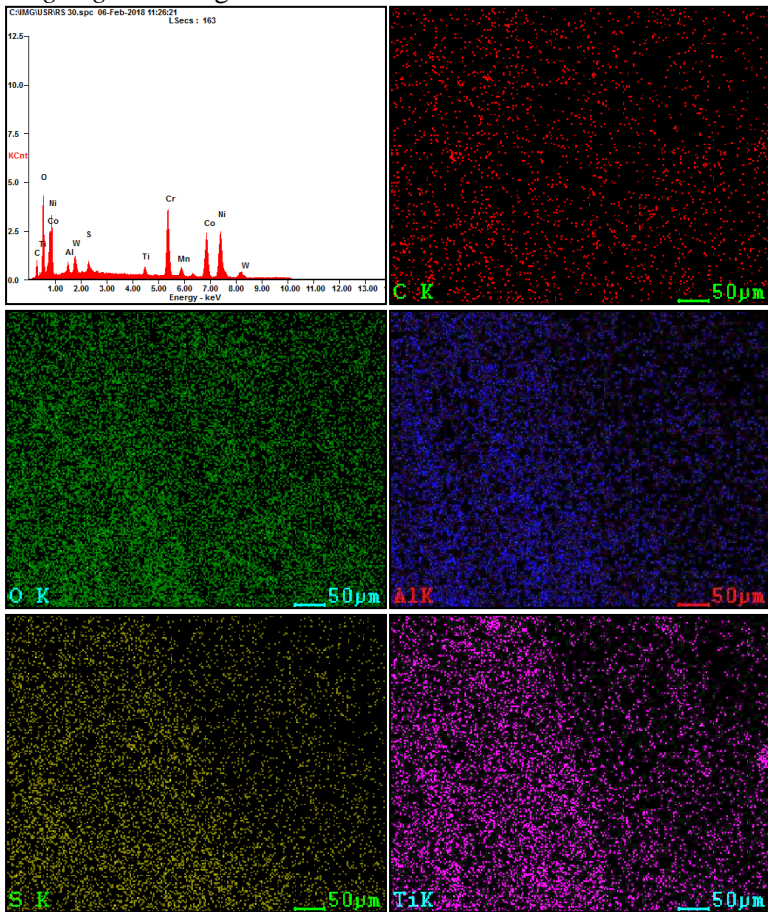


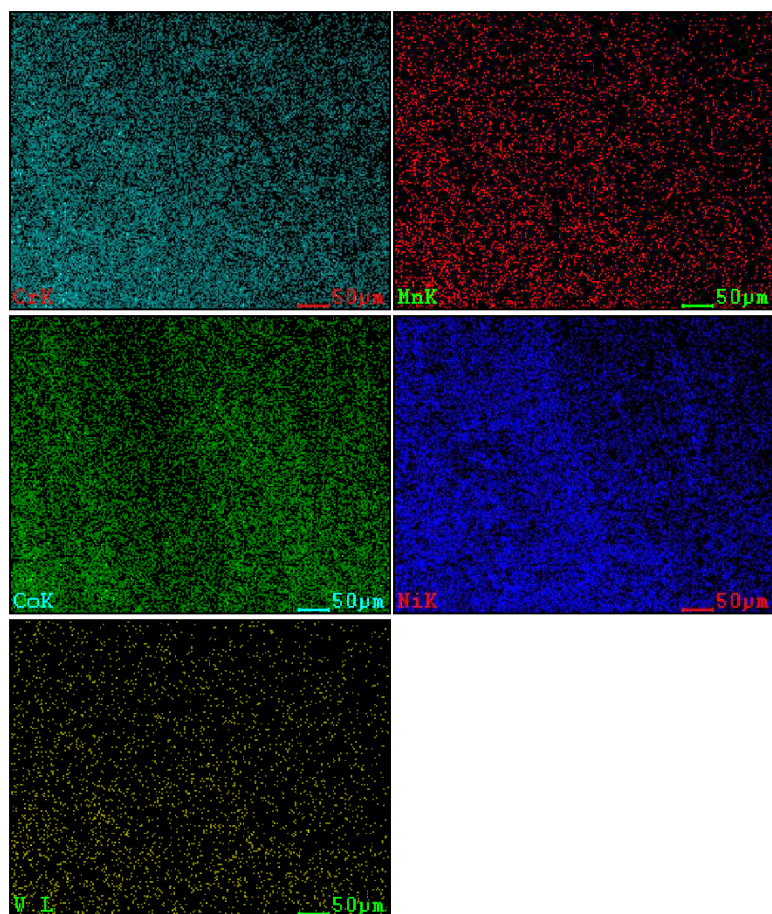
Ring Segment dengan Kode 29



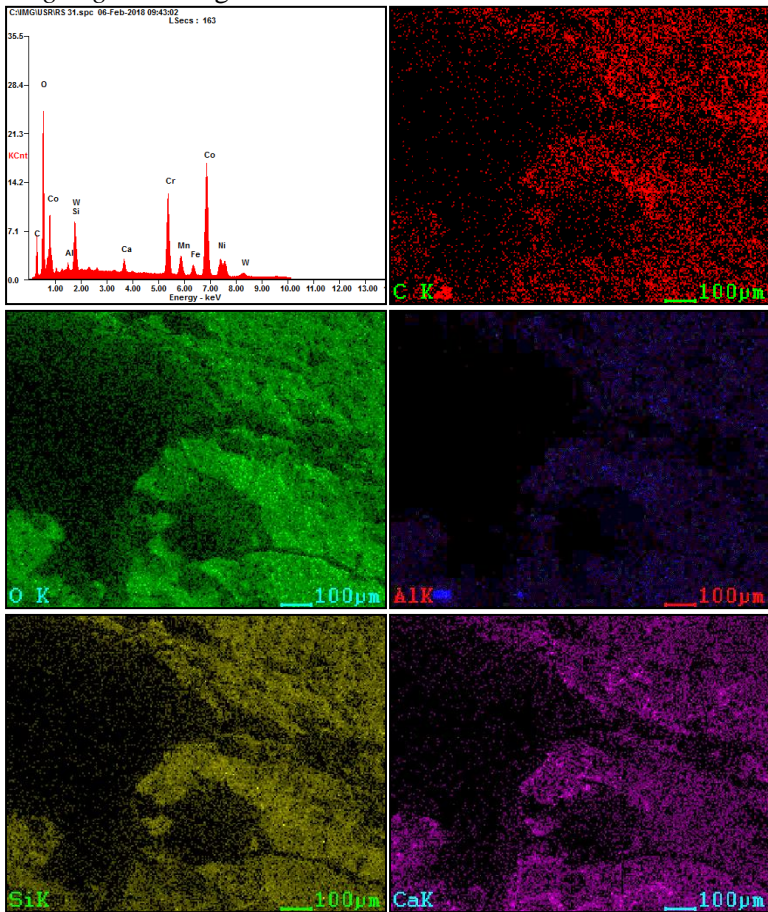


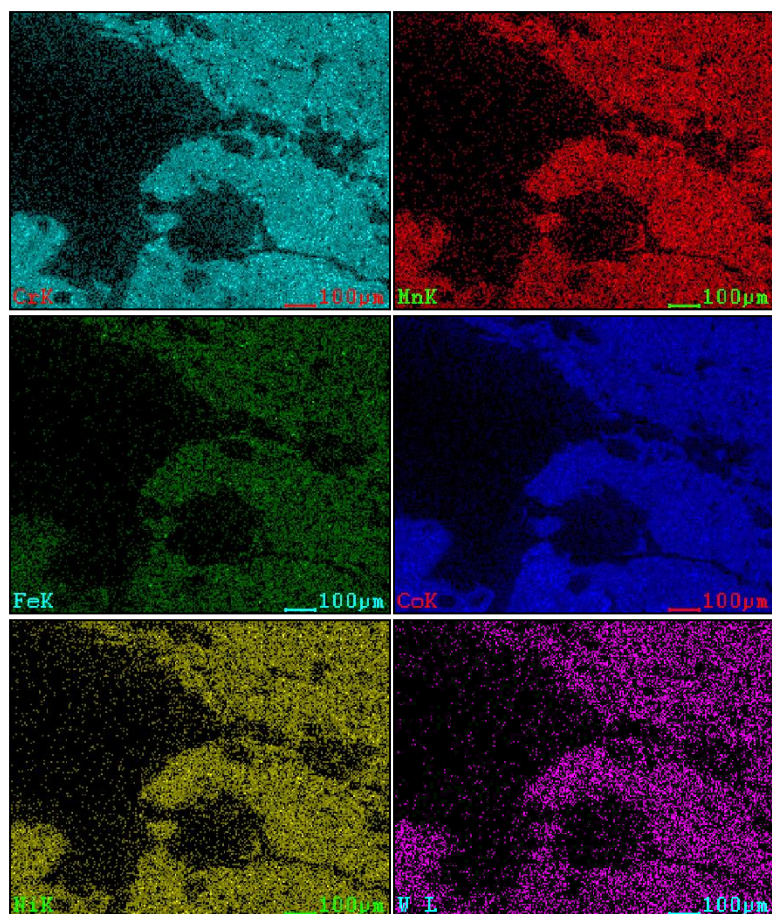
Ring Segment dengan Kode 30



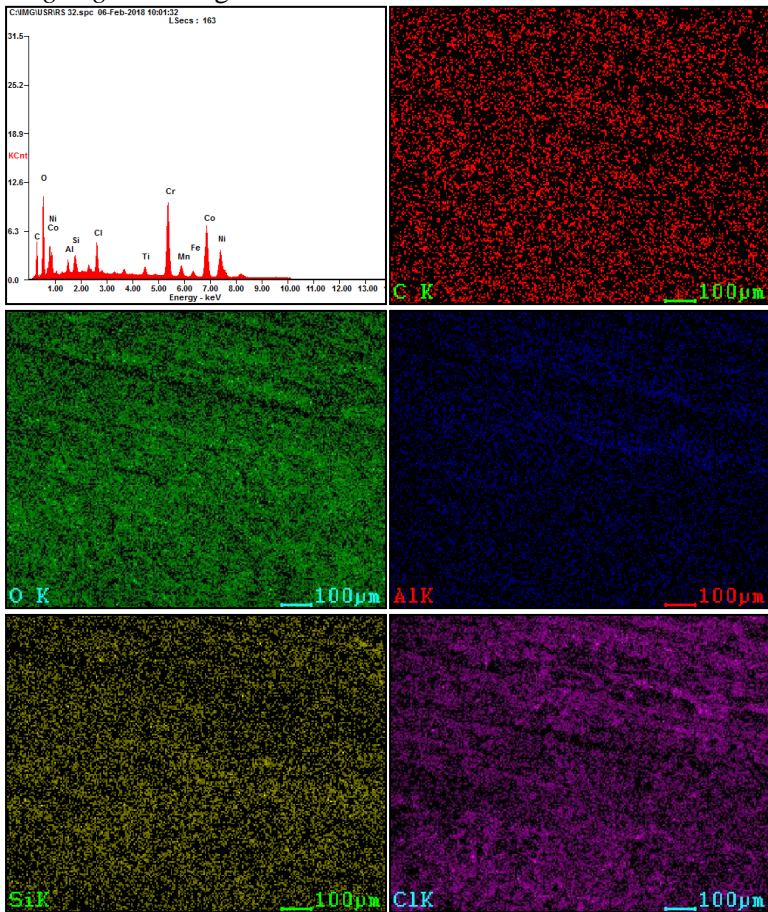


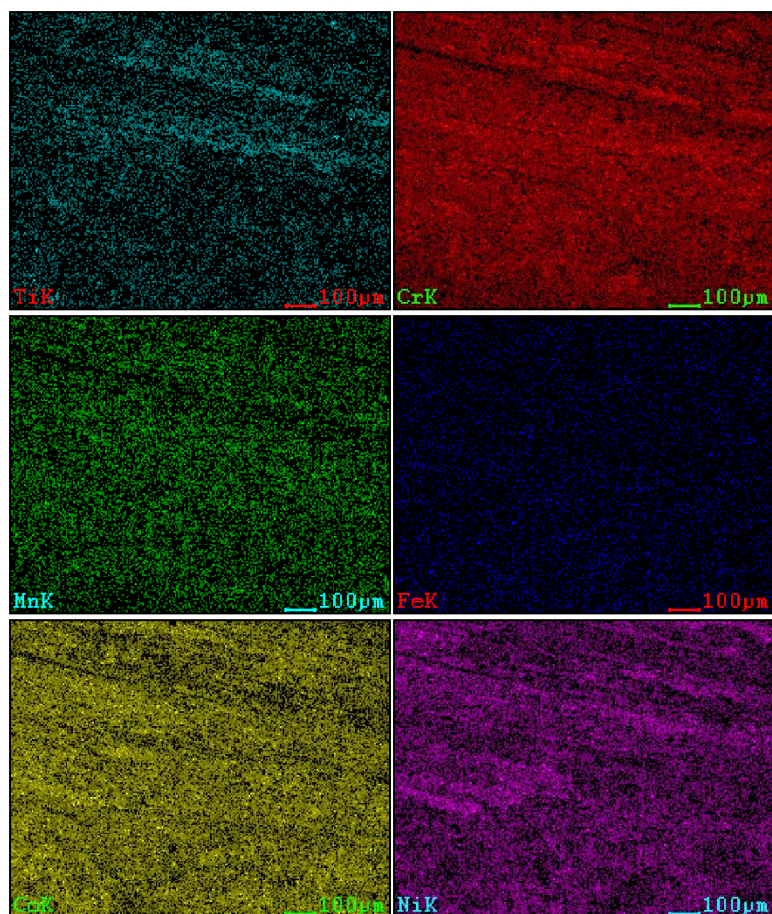
Ring Segment dengan Kode 31





Ring Segment dengan Kode 32





BIODATA PENULIS



Riyan Renardi, lahir di Surabaya pada tanggal 12 Januari 1996. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Kalirungkut I Kota Surabaya. Kemudian dilanjutkan ke SMP Negeri 35 Kota Surabaya. Kemudian melanjutkan di SMA Negeri 17 Kota Surabaya. Lalu penulis melanjutkan pendidikannya ke perguruan tinggi negeri di Institut Teknologi Sepuluh Nopember yaitu di Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri.

Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan Pelatihan yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT). Selama menempuh masa perkuliahan penulis juga tercatat aktif mengikuti organisasi di departemen. Penulis tercatat sebagai Staff di Departemen Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi periode 2015/2016. Penulis juga tercatat sebagai Wakil Kepala Departemen di Departemen Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi periode 2015/2016. Tugas akhir yang disusun penulis yaitu dalam bidang Korosi dan Analisa Kegagalan dengan judul “Analisis Kegagalan *Ring Segment Cobalt Base Superalloys X40* pada Turbin Gas Pembangkit Listrik PT. X”.